

ROBERTO RAFAEL ZORZI

A UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NO
MONITORAMENTO DE BARRAGENS.

ESTUDO DE CASO: USINA HIDRELÉTRICA DE
SALTO CAXIAS, EM CAPITÃO LEÔNIDAS MARQUES / PR

Dissertação apresentada como
requisito parcial à obtenção do
grau de Mestre, pelo Curso de
Pós-Graduação em Geologia,
Departamento de Geologia, Setor
de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Augustinho
Rigoti

Curitiba
2008

Zorzi, Roberto Rafael

A utilização de métodos geofísicos no monitoramento de barragens.
Estudo de caso: usina hidrelétrica de Salto Caxias, em Capitão Leônidas
Marques / PR / Roberto Rafael Zorzi. - Curitiba, 2008.

84 f.: il., tabs, grafs.

Orientador: Prof. Dr. Augustinho Rigoti

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia.

Inclui Bibliografia.

1. Barragens de concreto - Monitoramento. 2. Métodos geoeletricos.
3. Geofísica. I. Rigoti, Augustinho. II. Título. III. Universidade Federal do
Paraná.

CDD 627.8

TERMO DE APROVAÇÃO

Roberto Rafael Zorzi

A UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS. ESTUDO DE CASO: USINA HIDRELÉTRICA DE SALTO CAXIAS, EM CAPITÃO LEÔNIDAS MARQUES/PR.

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:


Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga - UNESP


Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas - USP


Prof. Dr. Augustinho Rigoti - UFPR
Presidente

Curitiba, 26 de fevereiro de 2008.

“A coisa mais importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão para existir”. (A. Einstein)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só se tornou possível com o apoio da Cia. Paranaense de Energia – COPEL, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC e da Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, pela geração de recursos e pelo interesse no tema apresentado e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo benefício da lei 8.010/90.

Meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de alguma forma me auxiliaram na execução desta pesquisa. Dentre elas, Elizeu S. Ferreira, Marcelo Madeira, Marcos A. Soares e Roberto Seara, da Copel, João Luis Alves, Paulo Roberto Chamecki e Roberta Bomfim Boszczowski do Lactec, aos professores do departamento de geomática da UFPR, Luis Augusto Koenig Veiga, Carlos Aurélio Nadal, Pedro Luis Faggion e toda sua equipe.

À minha família e amigos, pelo apoio e paciência dedicados.

E por último, pois o melhor sempre está no final, um muitíssimo obrigado ao meu orientador e AMIGO, AUGUSTINHO RIGOTI, por todo tempo e esforço a mim dedicados.

RESUMO

Acidentes de rompimento de barragens podem ser originados instantaneamente por força de eventos tectônicos, mas com maior probabilidade pode-se esperar que o processo de rompimento seja gradual, em consequência de descontinuidades que se criam no corpo da barragem ou na terminação de suas ombreiras. A percolação persistente pela água através das descontinuidades causa alteração, lixiviação, agravando o problema e deteriorando a resistência mecânica até o rompimento. A percolação pela água é denunciada por surgências a jusante, mas o caminho preferencial do fluxo é desconhecido.

A utilização dos ensaios geofísicos no maciço da barragem da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (Salto Caxias) teve como objetivo principal testar metodologia, complementar ao sistema de monitoramento hoje existente. Mais especificamente, utilizou-se o método SP (“self potential”) com o objetivo de mapear os caminhos preferenciais da água, enquanto que os ensaios de resistividade tiveram um papel complementar, fornecendo informação sobre o grau de saturação (conteúdo em água) no corpo da barragem. O arranjo gradiente, pela maior praticidade que apresenta, foi o escolhido como arranjo eletródico mais adequado para mapeamento de variações laterais de resistividade em tal meio de alta resistência de contato concreto-eletrodos.

Escolheu-se como área de estudo a região entre os blocos B10, B11 e B12, privilegiando, desta forma a zona de fissura do bloco B11. Os degraus de jusante, de maneira geral, serviram como linhas de ensaio para os métodos geoelétricos.

Os resultados foram satisfatórios em se tratando de barragem de concreto. A porosidade do concreto compactado com rolo (CCR) utilizado na construção do maciço da barragem tornou os ensaios factíveis. Através de contato iônico foi possibilitou-se mapear o SP com boa repetibilidade e transmitir uma corrente adequada para medidas de potencial confiáveis no arranjo gradiente. Ambos os métodos detectaram a zona de fissuramento principal, que se revela como um lineamento de valores positivos anômalos no SP e uma faixa de baixa resistividade na técnica do gradiente, também conhecida como arranjo retângulo.

Palavras – Chave: Barragens, monitoramento, métodos geoelétricos

ABSTRACT

Dam ruptures may happen suddenly due to tectonic events, but more likely they result from a progressive process as a consequence of discontinuities originated in the body of the dam or in its shoulders. A persistent water percolation through the discontinuities causes alteration and lixiviation, deteriorating the mechanic resistance till the rupture. The water percolation is unveiled by downstream emerging water, but the flux path is unknown.

The application of Geophysics to monitor the concrete body of Salto Caxias dam had the main objective of testing a known methodology, in order to complement the existing monitoring program. More specifically, the SP (Self Potential) method was used to map the preferential water pathways, while resistivity had a complementary role, providing information on the saturation degree (water content) in the dam body. The gradient array was chosen since it is the best electrode array for mapping resistivity lateral variation in a high concrete-electrode contact resistance medium.

The region within blocks B10, B11 and B12 was chosen as the study area in order to include the fracture zone of block B11. The downstream steps in a general way served as cut lines for the geophysical survey.

Results were satisfactory as they were obtained on a concrete dam. The porosity of the roller compacted concrete (RCC) used in the construction of the dam made possible the experiments. Through ionic contact it was possible to map SP with good repeatability and to transmit an adequate current for reliable potential measurements in the gradient array. Both methods detected the main fracture zone, which shows up as a high positive anomalous SP values lineament and a strip of low resistivity in the gradient technique, also known as rectangle array.

Keywords: Dams, monitoring, geoelectric methods

SUMÁRIO

	RESUMO.....	ii
	ABSTRACT.....	iii
	LISTA DE FIGURAS.....	v
	LISTA DE FOTOS.....	vii
	LISTA DE TABELAS.....	viii
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	1
1.2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E HISTÓRICO.....	2
2	CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO.....	7
2.1	GEOLOGIA DA BACIA DO PARANÁ.....	8
2.2	ESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ.....	8
2.3	CONTEXTO TECTONO-ESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ.....	13
2.4	CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL.....	16
3	FUNDAMENTO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS.....	19
3.1	BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS.....	19
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS.....	25
3.3	ARRANJO GRADIENTE.....	25
3.4	POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	33
4	AQUISIÇÃO GEOFÍSICA.....	36
4.1	ESCOLHA DO ARRANJO E ÁREA DE ESTUDO.....	36
4.2	PRIMEIRA CAMPANHA DE CAMPO.....	41
4.3	SEGUNDA CAMPANHA DE CAMPO.....	47
4.4	TERCEIRA CAMPANHA DE CAMPO.....	52
4.5	QUARTA CAMPANHA DE CAMPO.....	56
5	PROCESSAMENTO DOS DADOS E COMENTÁRIOS.....	58
5.1	ENSAIOS DE RESISTIVIDADE COM ARRANJO GRADIENTE.....	58
5.2	POTENCIAL ESPONTÂNEO.....	71
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2.1:	Mapa de Localização da UHE Salto Caxias (mod. Levis et al, 1998).....	3
Figura 1.2.2:	Tridimensional esquemático da fissura na seção da barragem do B11 (Soares, 2005).....	5
Figura 2. 1:	Mapa do Paraná com as cinco principais zonas geomorfológicas.....	7
Figura 2.1.1:	Mapa geológico esquemático da Bacia do Paraná com as principais unidades litoestratigráficas (Paulipetro, 1981).....	9
Figura 2.3.1:	Arcabouço Estrutural do Estado do Paraná, evidenciando as principais estruturas. (mod. Zalán et al. 1987).....	15
Figura 2.4.1:	Perfil geológico ao longo da linha base do circuito de geração (Levis et al, 1998).....	17
Figura 3.1.1:	Eletrodo na origem do sistema de coordenadas. S é a superfície da esfera de raio r.....	22
Figura 3.1.2:	Desenho esquemático da transmissão de corrente elétrica pelo solo.....	23
Figura 3.2.1:	Mapa esquemático com a disposição dos eletrodos para arranjo gradiente (mod. Braga, 2007).....	27
Figura 3.2.2:	Fator K para AB=40m.....	29
Figura 3.2.3:	Fator K para AB=50m.....	30
Figura 3.2.4:	Fator K para AB=60m.....	31
Figura 3.2.1:	Fator K para AB=80m.....	32
Figura 4.2.1:	Mapa de resistividade aparente obtido no primeiro teste com arranjo gradiente. Dezembro/06.....	46
Figura 4.3.1:	Corte esquemático da barragem com o posicionamento das principais estações de medidas realizadas em fevereiro/2007.....	52
Figura 4.4.1:	Corte transversal esquemático com o posicionamento das linhas de ensaio.....	54
Figura 4.4.2:	Corte longitudinal esquemático com o posicionamento das linhas de ensaio.....	55

Figura 5.1.1:	Resistividade aparente do arranjo gradiente em fev-2007. De cima para baixo, no lado esquerdo, ABs de 30, 40 e 50m; no lado direito, ABs de 60 e 80m. A escala de cor é individual, diferente para cada mapa.....	61
Figura 5.1.2:	Resistividade aparente do arranjo gradiente em fev-2007 como na figura 5.1.1, quando a escala de cores é uma só para todos os 5 ABs.....	62
Figura 5.1.3:	Resistividade aparente do arranjo gradiente em julho-2007. De cima para baixo, no lado esquerdo, ABs de 40, 50 e 60m; no lado direito, AB de 80m. A escala de cor é individual, diferente para cada mapa.....	64
Figura 5.1.4:	Resistividade aparente do arranjo gradiente em julho-2007 como na figura 5.1.3, quando a escala de cores é uma só para todos os 4 ABs.....	65
Figura 5.1.5:	Mapas de resistividade aparente para o AB=40m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.....	67
Figura 5.1.6:	Mapas de resistividade aparente para o AB=50m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.....	68
Figura 5.1.7:	Mapas de resistividade aparente para o AB=60m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.....	68
Figura 5.1.8:	Mapas de resistividade aparente para o AB=80m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.....	69
Figura 5.1.9:	Derivada direcional Dx sobre os dados de resistividade aparente do levantamento gradiente de julho de 2007: AB=40m (esquerda superior); AB=50m (esquerda inferior); AB=60m (direita superior); AB=80m (direita inferior).....	70
Figura 5.2.1:	Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Fevereiro/07.....	71
Figura 5.2.2:	Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Julho/07. Com malha de 12 metros.....	72
Figura 5.2.3:	Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Julho/07. Eixos positivos de SP que indicam caminhos preferenciais do fluxo.....	72
Figura 5.2.4:	Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Julho/07. Com malha expandida de 16 metros. Ao lado, a correlação com situação encontrada em campo.....	73

Figura 5.2.5:	Correlação entre a resistividade aparente para AB=40m (canto superior esquerdo) com a sua derivada Dx (canto inferior esquerdo) e com o SP (canto superior direito) do levantamento de julho.....	74
Figura 5.2.6:	Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Setembro/07. Com malha expandida de 65 metros. No canto inferior esquerdo, o mapa de julho/07.	75
Figura 5.2.7:	Correlação entre o baixo de SP e as condições encontradas em campo. Na figura A observa-se a anomalia negativa de SP (tons de azul). Na figura B estão dispostas as projeções das galerias superior e inferior, a adufa de compensação e do topo rochoso. Na figura C as condições de fraturamento à jusante do maciço.....	77

LISTA DE FOTOS

Foto 1.2.1:	Foto área da barragem da UHE Gov. José Richa. As linhas vermelhas marcam as principais fissuras. (Soares, 2005).....	4
Foto 3.3.1:	Equipamento para determinação de SP e resistividade.....	34
Foto 3.3.2:	Eletrodos não polarizáveis (potes cerâmicos) usados no SP e resistividade.....	34
Foto 4.1.1:	Vista de jusante Barragem da UHE Gov. José Richa. Os retângulos vermelhos marcam as zonas de fissuras dos blocos B5, B8 e B11, da esquerda para direita. Fotografia por satélite obtida pelo site www.wikimapia.org . Acesso em 30/11/06.....	37
Foto 4.1.2:	Barragem da UHE Gov. José Richa. Zona de fissura do bloco B5. Vista jusante.....	38
Foto 4.1.3:	Barragem da UHE Gov. José Richa. Zona de fissura do bloco B8. Vista jusante.....	39
Foto 4.1.4:	Barragem da UHE Gov. José Richa. Zona de fissura do bloco B11. Vista jusante.....	39
Foto 4.1.5:	Área de estudo na rampa jusante da UHE de Salto Caixas (zona de fissura do Bloco B11).....	40
Foto 4.2.1:	Disposição das linhas de ensaio para o SP realizado em dezembro/06.....	42

Foto 4.2.2:	Disposição das linhas de ensaio para o arranjo gradiente realizado em dezembro/06.....	43
Foto 4.2.3:	Arranjo gradiente realizado na barragem de UHE Gov. José Richa em dezembro/06.....	45
Foto 4.3.1:	Disposição das linhas de ensaio para arranjo gradiente. UHE GJR. Fevereiro/07.....	48
Foto 4.3.2:	Eletrodos de corrente confeccionados com papel alumínio sobre argila com água salgada.....	48
Foto 4.3.3:	Junção dos eletrodos de potencial para aumentar a superfície de contato concreto-eletrodo.....	49
Foto 4.3.4:	Eletrodos de referência instalados à jusante da barragem.....	50
Foto 4.4.1:	Disposição das linhas de ensaio para arranjo gradiente. UHE GJR. Julho/07.....	53
Foto 4.5.1:	Fotomosaico da área de estudo de 4ª. Campanha de campo, realizada em setembro/2007. UHE Salto Caxias.....	56
Foto 4.5.2:	Vista jusante das fissuras do bloco B11. As linhas tracejadas horizontais representam as projeções das linhas de ensaio de SP nesta etapa. No canto inferior direito pode-se observar a “adufinha” e o contato entre o concreto da barragem e o maciço rochoso.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. 1.1:	Conjunto das prováveis causas que originaram as fissuras na barragem da UHE Gov. José Richa (Salto Caxias) (Soares, 2005).....	6
Tabela 4.3.1:	Coordenadas geográficas das principais estações de medidas usadas para ensaio de resistividade e potencial espontâneo.....	51

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida como parte integrante do projeto “Automação da instrumentação de auscultação geodésica de controle e segurança da barragem de Salto Caxias”, com financiamento da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL realizado através da parceria entre a Cia. Paranaense de Energia – COPEL, o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC e a Universidade Federal do Paraná – UFPR, com o objetivo de auxiliar no monitoramento contínuo desta estrutura para determinação de possíveis deformações.

Neste trabalho estão mostrados os resultados dos levantamentos geofísicos através de ensaios geoeletricos realizados em um trecho da barragem da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (Salto Caxias), em Capitão Leônidas Marques, PR, a fim de analisar a aplicabilidade destes métodos geofísicos na detecção e monitoramento do fluxo de água no interior da estrutura.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Acidentes de rompimento de barragens podem ser originados instantaneamente por força de eventos tectônicos, mas com maior probabilidade pode-se esperar que o processo de rompimento seja gradual, em consequência de descontinuidades que se criam no corpo da barragem ou na terminação de suas ombreiras, como o ocorrido na barragem de Câmara (PB) em junho de 2004 (Carvalho *et al*, 2004).

A percolação persistente da água através das descontinuidades causa alteração, lixiviação, agravando o problema e deteriorando a resistência mecânica dos maciços até o rompimento. A percolação da água é denunciada por surgências a jusante, mas o caminho preferencial do fluxo é desconhecido. Alguns métodos diretos de investigação, como furos de sondagem, são utilizados para

inspecionar caminhos suspeitos, mas tratam-se de investigações volumetricamente pouco representativas.

Os métodos elétricos e sísmicos são muito utilizados nas fases de viabilidade e construção, porém pouco tem sido feito na fase de inspeção na engenharia de barragem (Oliveira, 1998).

Entende-se que eles têm um papel importante a cumprir, também no período de monitoramento (Corwin, 1989), com o intuito de aumentar a vida útil do investimento.

Os ensaios geofísicos utilizados nos estudos de monitoramento da Barragem de Salto Caxias objetivaram determinar metodologia capaz de detectar descontinuidades no corpo de uma barragem. Embora sejam métodos indiretos de investigação, em que a modelagem numérica (física-matemática) não tem solução única e, conseqüentemente, a interpretação tem um certo grau de ambigüidade, apresentam vantagens de amostragem mais abrangente e de forma mais contínua do que as investigações diretas por sondagens mecânicas. Outro aspecto importante para o presente estudo é o caráter não invasivo dos métodos geofísicos.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E HISTÓRICO

A usina Governador José Richa (Salto Caxias), em operação desde o mês de outubro de 1998, está localizada no rio Iguaçu a cerca de 204 km de sua foz, no município de Capitão Leônidas Marques distante aproximadamente 600 km de Curitiba (Fig. 1.2.1). Possui uma barragem do tipo gravidade em concreto compactado com rolo (CCR), com face (montante) em concreto convencional, sendo uma das maiores estruturas do gênero no Brasil, com 1.083 m de comprimento na crista e altura máxima de 67 m em relação ao leito do rio. Possui um vertedouro, com núcleo de CCR revestido de concreto convencional, incorporado à barragem, com uma capacidade de vazão da ordem de 50.000 m³/s. Os volumes de concreto envolvidos na construção foram de 945.600 m³ de

CCR na barragem e de 546.000 m³ de concreto convencional (CCV) em todo o empreendimento.

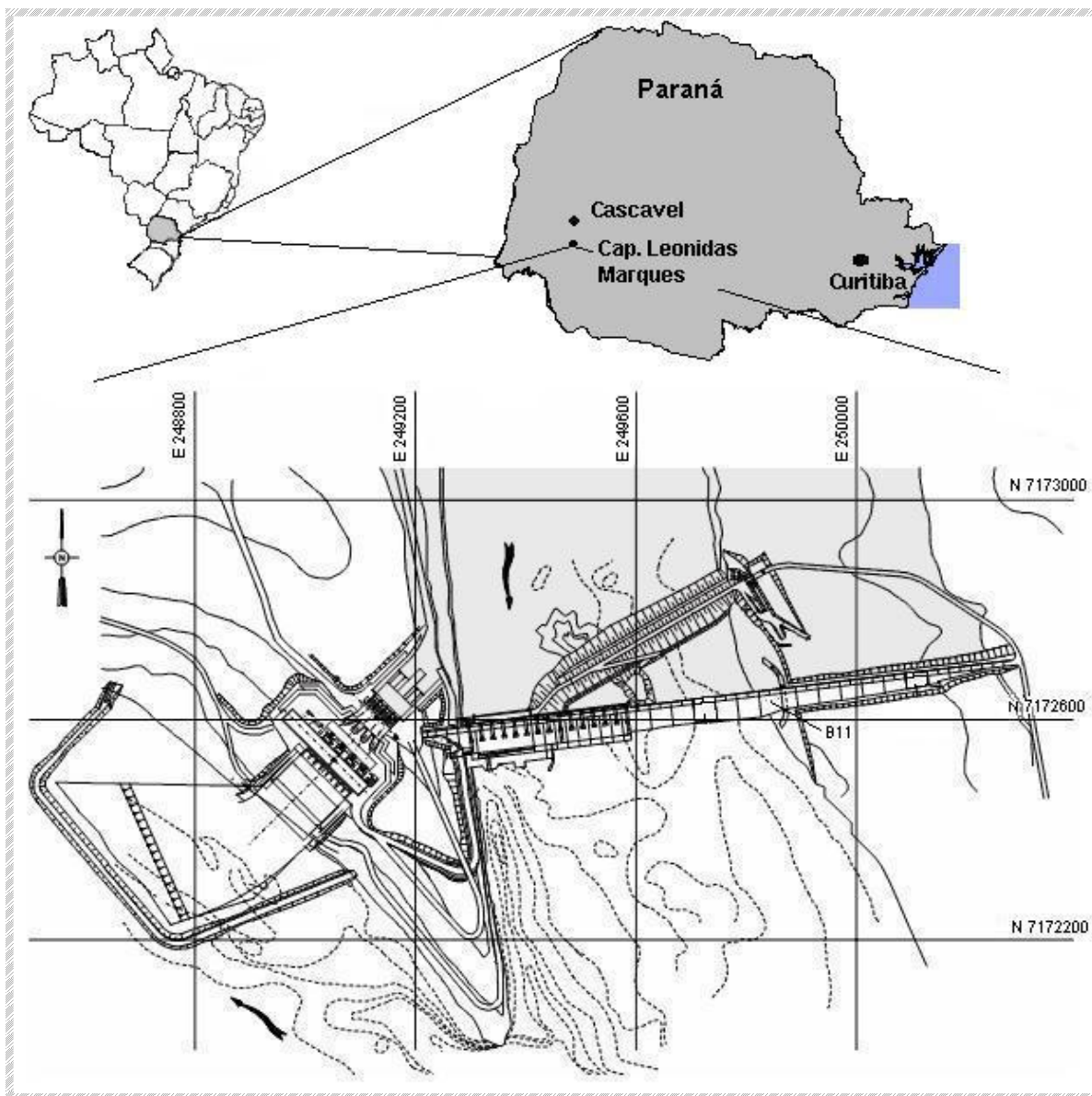


Figura 1.2 1: Mapa de Localização da UHE Salto Caxias (mod. Levis et al, 1998).

Nos dois primeiros anos, após o enchimento do reservatório, foram constatadas 6 (seis) fissuras na estrutura, sendo as principais localizadas nos blocos B5, B8 e B11 (Soares, 2005).

Estas fissuras são regiões na barragem com razoáveis infiltrações, sendo nítida sua visualização tanto no interior da galeria quanto nos degraus de jusante. O efeito destas fissuras na estrutura concretada vem sendo monitorado e avaliado constantemente.

A fissura do bloco B5 está situada na região de junção da barragem com o vertedouro, próximo à junta n°21, têm a influência dos drenos da cortina intermediária de n° 23, 24 (galeria superior), n° 328 e 329 (galeria inferior). A fissura no bloco B8 situa-se próximo à junta induzida de n°28 (B8/B8), interfere nos drenos de n° 57 (galeria superior) e n° 375 (galeria inferior) (foto 1.2.1).



Foto 1.2.1: Foto área da barragem da UHE Gov. José Richa. As linhas vermelhas marcam as principais fissuras. (Soares, 2005).

A fissura no bloco B11 (Fig. 1.2.2), identificada antes do enchimento, interceptava inicialmente o dreno de n° 414, antes das injeções de calda de cimento em março de 1999.

Segundo Soares (2005), acredita-se que a ocorrência das fissuras dos blocos B5, B8 e B11, é de origem térmica, resultante do resfriamento da massa de concreto da barragem. Na tabela 1.1.1 mostram-se algumas das principais ocorrências e prováveis causas do surgimento destas fissuras.

As outras três fissuras surgiram em 2005 induzindo a junta dos blocos B16/B16, B17/B17 e B19/B19, a abrirem fora do local projetado. Estas fissuras são observadas somente nas galerias e na face de jusante. Na face de montante somente são observadas as juntas e não as fissuras (Soares, 2005).

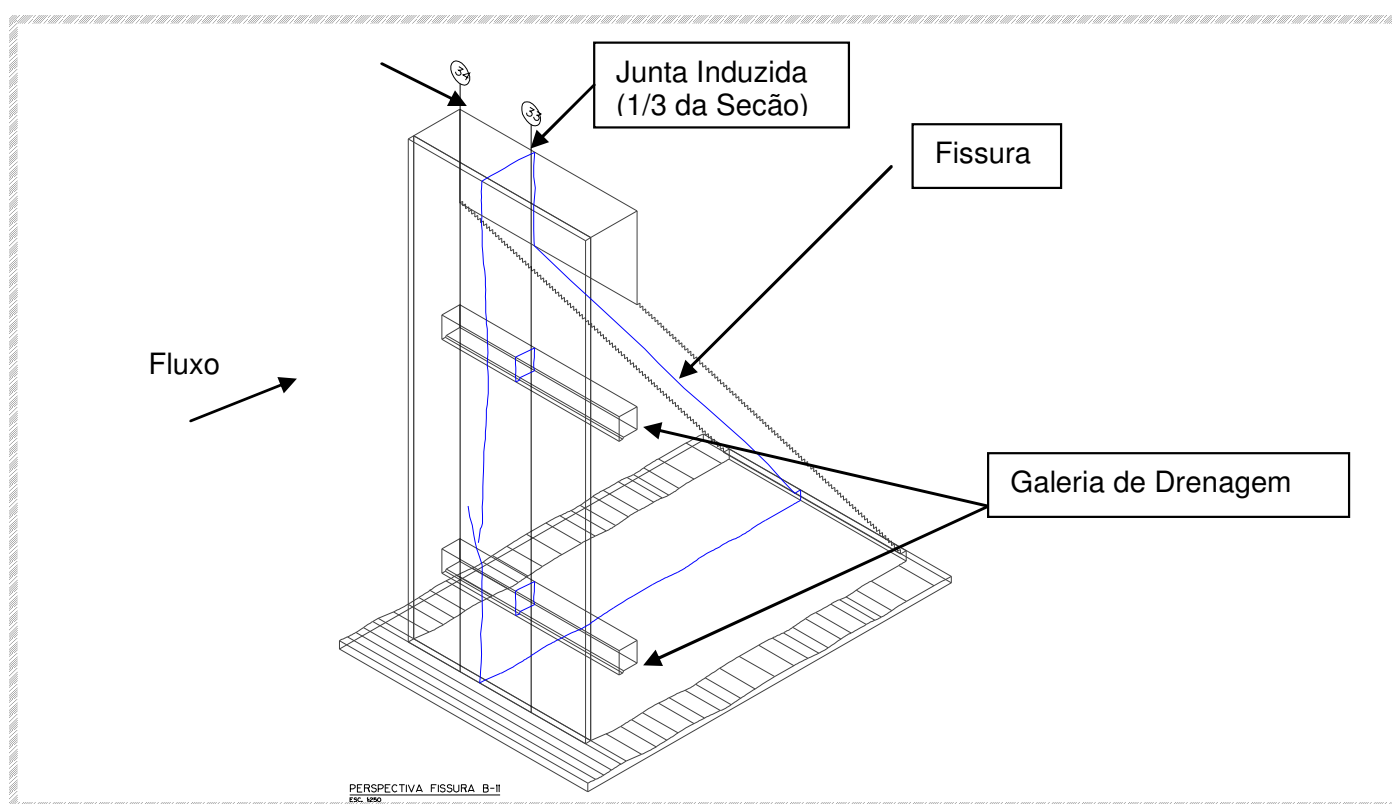


Figura 1.2 2: Tridimensional esquemático da fissura na seção da barragem do B11 (Soares, 2005).

Após o constante monitoramento realizado depois do enchimento do reservatório, verificou-se que a temperatura ambiente tem grande influência no maciço de CCR da barragem, principalmente nas medições de abertura e vazões de infiltração nas juntas e também nas fissuras.

Durante o período de inverno, de junho a setembro, quando as temperaturas registram valores freqüentes abaixo de 10°C, há uma influência direta na 'trabalhabilidade' do maciço de CCR, retraindo-o e, conseqüentemente, abrindo as juntas e fissuras existentes na face de montante, ocasionando numa maior passagem da água, aumentando a vazão local, principalmente nas regiões citadas. A contribuição da vazão nas três (03) regiões tem um percentual de aumento entre 20% a 40% em relação à vazão total, no período de inverno e 10% a 20% fora deste período (Soares, 2005).

Tabela 1.1.1: *Conjunto das prováveis causas que originaram as fissuras na barragem da UHE Gov. José Richa (Salto Caxias) (Soares, 2005).*

Ocorrência	Causa
Taxa de cimento do CCR, aproximadamente 100 kg/m³.	Gera maior calor, maior tensão interna, com temperaturas mais elevadas e maior probabilidade de ocorrência de fissuras.
Interferência entre o fenômeno de fluência do concreto e o fenômeno térmico.	Tensões internas no concreto.
Trecho da barragem do leito do rio executada em três fases e galgamento.	Diferença de concretagem e da temperatura interna e ambiente em 11 meses, entre a região inferior e a superior do maciço.
Concretagem no período de verão.	Temperatura ambiente e do CCR muito elevada.
Alteração do cronograma de execução com adiantamento em 6 meses.	Aumento no ritmo e volume de lançamento.
Ritmo intenso de execução.	Dificuldade na dissipação de calor do CCR.
Volume muito grande de CCR.	Dificuldade na dissipação de calor do CCR.
Rebaixamento no trecho devido ao 'overtop'. Ocorrem 5 passagens da água.	Deformação natural entre o concreto novo com o concreto velho (mais frio).
No bloco B11 a colocação da junta tipo Jenne somente até El. 281.	A fissura expandiu até a fundação El 264.
A não formação esperada da junta de indução, verificada nas galerias e na face de jusante.	Criação de novas 'juntas' (fissuras).
Tamanho dos blocos (40 em 40 m com juntas plenas e a cada 20m intermediário às juntas induzidas).	Muitas juntas induzidas não foram identificadas no local projetado, surgindo novas fissuras.

2. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO

O Estado do Paraná tem cinco zonas naturais de paisagem, sendo divididas em: Litoral, Serra do Mar, Primeiro Planalto, Segundo Planalto e o Terceiro Planalto (Fig. 2.1).

A área de estudo está localizada no terceiro planalto paranaense, numa região enquadrada no denominado Altiplano Basáltico Paranaense.

O Terceiro Planalto, com quase 135 mil quilômetros quadrados de área, é coberto predominantemente por rochas efusivas básicas, localmente ácidas, sendo apenas no noroeste do Estado os basaltos cobertos por sedimentos Cenozóicos do Grupo Bauru. As formações geológicas basálticas dão origem aos solos argilosos, muito conhecidos como “terra roxa”.



Figura 2.1: Mapa do Paraná com as cinco principais zonas geomorfológicas.

2.1 GEOLOGIA DA BACIA DO PARANÁ

A bacia intracratônica do Paraná ocupa uma área de aproximadamente 1.500.000 km², no Brasil, e ocupa ainda parte da Argentina, Paraguai e Uruguai. A sua dimensão norte-sul atinge quase 2000 km no território nacional, apresentado uma orientação NNW no seu eixo principal. Abrange parte dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Fig. 2.1.1). Possui inclinação homoclinal em direção ao oeste, porção mais deprimida. Sua forma superficial côncava deve-se ao soerguimento flexural denominado Arqueamento de Ponta Grossa (Schobbenhaus *et al.* 1984, Milani *et al.* 1994).

Alguns autores propõem um ambiente de sedimentação pouco perturbado por fenômenos tectônicos e como consequência, suas unidades litoestratigráficas apresentam grande continuidade lateral com pequenas variações faciológicas (Schobbenhaus *et al.* 1984).

2.2 ESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ

A estratigrafia mais utilizada atualmente para a Bacia do Paraná é a proposta na revisão de Milani *et al.* (1994) com base no trabalho clássico de Schneider *et al.* (1974). Milani *et al.* (1994) dividiram o registro estratigráfico da Bacia do Paraná em seis superseqüências limitadas por discordâncias regionais, sendo elas: a Superseqüência Rio Ivaí de idade Ordovício-Siluriana; a Superseqüência Paraná correspondente às Formações de idade Devoniana; a Superseqüência Gondwana I, do Neo-Carbonífero ao Eo-Triássico; a Superseqüência Gondwana II correspondente às Formações Pirambóia e Rosário do Sul; a Superseqüência Gondwana III que corresponde ao Grupo São Bento, e por fim a Superseqüência Bauru do Neo-Cretáceo, onde novas condições de

sedimentação continental foram instaladas na Bacia do Paraná, com a deposição dos Grupos Bauru e Caiuá.

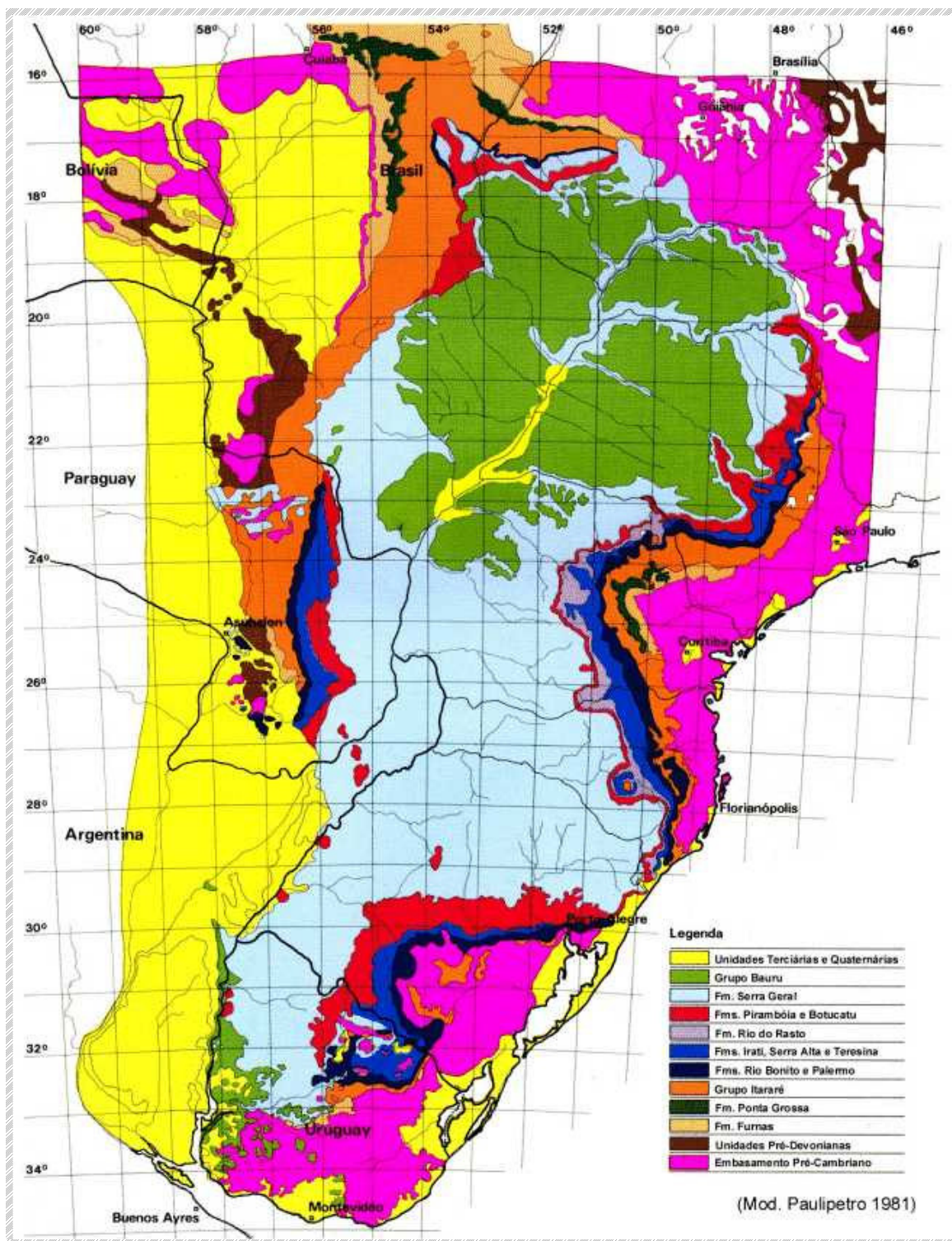


Figura 2.1.1: Mapa geológico esquemático da Bacia do Paraná com as principais unidades litoestratigráficas (Paulipetro, 1981).

- GRUPO SÃO BENTO

O Grupo São Bento foi formado no Meso-Triássico após o término da deposição da Formação Rio do Rasto e o ciclo erosivo de proporções continentais que se sobresegiu. As atividades tectono-magmáticas que ocorreram durante o Mesozóico afetaram os seus compartimentos com a reativação do Arco de Ponta Grossa, representado pelo enxame de diques de diabásio, diorito, diorito-pórfiro e quartzo-diorito. Compreende as formações Pirambóia e Botucatu, seqüência sedimentar continental Triássica-Jurássica e os derrames basálticos da Formação Serra Geral (Schobbenhaus *et al.* 1984, Milani *et al.* 1994).

Na Formação Pirambóia ocorrem arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, variando de médios a muito finos (siltico-argilosos), de grãos subangulares a subarredondados.

Na porção mais inferior, ocorrem camadas areno-argilosas de 1 metro a 2 metros de espessura, de cor avermelhada, com seixos de sílex. Ocorrem também intercalações de siltitos e folhelhos que variam de alguns milímetros até 1 metro de espessura. A estratificação plano-paralela é freqüente nos arenitos da Formação Pirambóia (Soares *et al.* 1973 *apud* Schobbenhaus *et al.* 1984). O contato inferior da Formação Pirambóia com o Grupo Passa Dois é do tipo gradacional (Riccomini *et al.* 1984). Segundo Petri (1983), a uniformidade textural e mineralógica de seus arenitos e a pobreza em minerais pesados indicam que o material da fonte sofreu mais de um ciclo de retrabalhamento. Os sedimentos da Formação Pirambóia são do tipo de canais e de depósitos de transbordamento, formando ciclos recorrentes. Conchostráceos, ostracodes e troncos silicificados de coníferas constituem o registro fóssil da Formação Pirambóia.

A Formação Botucatu, de ocorrência generalizada em toda a área da bacia, trata-se de uma seqüência de arenitos avermelhados, de granulação variando de fina à média, normalmente bimodais, de constituição quartzosa, friáveis e bem arredondados. Estratificações cruzadas (abundantes), planares e acanaladas de grande porte são características marcantes da Formação Botucatu. Tais características indicam uma deposição eólica em ambiente desértico, com

desenvolvimento de rios meandantes e pequenas lagoas, em condições climáticas oxidantes.

A passagem da Formação Pirambóia para os arenitos eólicos da Formação Botucatu é considerada concordante pela maioria dos autores, outros pesquisadores, porém, defendem a hipótese de contemporaneidade entre estas unidades, por não terem um contato nítido entre si e sim um contato gradativo. A Formação Botucatu dispõe-se discordantemente sobre o embasamento e as formações Furnas e Ponta Grossa e, também, com a Formação Serra Geral, a ela sobreposta. Por estas relações estratigráficas, atribui-se idade Juro-Cretácea para a Formação Botucatu (Riccomini *et al.* 1984, Petri 1983).

A deposição dos arenitos *red beds* do topo da Formação Botucatu foi contemporânea ao vulcanismo trapiano da Bacia do Paraná. Pacotes de espessura variável destas rochas sedimentares intercalam-se com as efusivas no contato entre elas, e são atravessadas por também por seus diques. Esta formação, embora relativamente muito tênue, também é exposta na janela estratigráfica do Domo de Vargeão (Paiva Filho, 2000).

O pacote de rochas vulcânicas foi denominado, originalmente, de eruptivas Serra Geral por White (1908). O nome Formação Serra Geral, no entanto, foi introduzido por Gordon Jr. (1947). Compreende um extenso conjunto de derrames de rochas ígneas de idade Eo-Cretácea, predominantemente basaltos. O magmatismo mesozóico recobre mais de 1.200.000 km² nos estados do sul e centro do país, atingindo também o noroeste do Uruguai, o nordeste da Argentina e sudoeste do Paraguai. Sua espessura alcança mais de 1000 metros em certos locais (Schobbenhaus *et al.* 1984).

As vulcânicas da Formação Serra Geral recobrem arenitos continentais reunidos nas formações Pirambóia e Botucatu. Na borda da bacia, também transgridem sobre as unidades paleozóicas e sobre o embasamento pré-cambriano. As lavas correram para o quadrante oeste, sobre as camadas sedimentares. Os derrames geralmente estão dispostos na forma sub-horizontal, com mergulhos ao redor de 1º (um grau) nos homoclinais não perturbados

tectonicamente, existentes na parte superior do pacote. Sob influência de anomalias estruturais como domos, *horsts*, *grabens*, falhas, e do paleo-relevo no interior da bacia, os ângulos de mergulho dos derrames podem variar localmente para graus maiores, até mais do que 20º (vinte graus) (Paiva Filho, 2000).

As espessuras individuais dos derrames variam de uma dezena a uma centena de metros, com média e valores mais comuns em torno de 50 metros (Leinz, 1949), e as maiores espessuras do pacote estão localizadas na região de Presidente Epitácio, SP, onde alcançam cerca de 1.800 metros.

No Estado do Paraná estes derrames afloram em toda região centro-oeste, no chamado Terceiro Planalto Paranaense, exceto o extremo noroeste do Estado, que é composto por arenitos do Grupo Bauru sobrepostos aos basaltos.

A Formação Serra Geral sempre foi considerada como não divisível estratigraficamente, devido ao fato da sua disposição em derrames, considerados pouco extensos pela maioria dos pesquisadores. Os trabalhos de compartimentação da unidade Serra Geral sempre foram baseados em estratigrafia litoquímica, na tentativa de subdividir o pacote de acordo com diferentes tipos de magmas extravasados. No entanto, Paiva Filho (2000), demonstrou, através de mapas e seções, uma primeira compartimentação estratigráfica da Formação Serra Geral, tendo como referência uma camada-guia denominada de riodacito pórfiro, de grande extensão regional, já reportada em trabalhos anteriores (Amaral *et al.*, 1982; Paiva Filho, 1998; Paiva Filho, 1999, *apud* Paiva Filho 2000).

As rochas basálticas de um modo geral (nesta denominação incluem-se termos ácidos e intermediários além dos básicos), possuem características geomecânicas que as tornam apropriadas para apoio de fundações e estruturas dos empreendimentos para geração de energia elétrica.

- GRUPO BAURU

Fazem parte deste grupo as formações:

Formação Adamantina: composta por arenitos finos a muito finos, lamitos e siltitos. Apresenta estruturas do tipo estratificação cruzada e plano-paralelas, sugerindo um ambiente de sedimentação de planície aluvial.

Formação Santo Anastácio: Formada por um ambiente de planície aluvial é predominantemente composta por arenitos muito finos a médios e localmente ocorrem bancos e lamitos avermelhados. Estratificações cruzadas e plano paralelas são as principais estruturas observadas.

Formação Caiuá: apresenta arenitos de coloração avermelhadas a arroxeadas, de granulação fina à média, com estratificações cruzadas de grande porte evidenciando um ambiente de deposição desértico, eólico e fluvial.

2.3 CONTEXTO TECTONO-ESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ

A bacia do Paraná é uma bacia sedimentar, intracratônica ou sinéclise que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana, e sua formação teve início a cerca de 400 milhões de anos, no Período Devoniano terminando no Cretáceo. A persistente subsidência na área de formação da bacia, embora de caráter oscilatório, possibilitou a acumulação de grande espessura de sedimentos, lavas basálticas e sills de diabásio, ultrapassando 5 km na porção mais profunda (Schobbenhaus *et al.* 1984).

- ESTRUTURAS ATECTÔNICAS

Nas regiões constituídas por derrames de basalto, as feições atectônicas possuem características bem conhecidas, interferindo diretamente na modelagem dos relevos regionais. Os principais tipos de feições atectônicas relacionadas aos

terrenos basálticos são: contato de derrames; fraturamentos colunares presentes nos núcleos dos derrames e fraturamentos sub-horizontais originados pelo resfriamento diferenciado das várias camadas de um derrame.

Quando se observa a disposição das fraturas em posição sub-horizontalizada, a geração de alívios de tensões produz modelagem de relevo que acompanham a configuração dos vales adjacentes.

- ESTRUTURAS TECTÔNICAS

Os lineamentos do arcabouço estrutural do território paranaense podem ser reunidos em duas direções principais: NE-SW (N40°-50°E) e NW-SE (N30°-50°W). Nos lineamentos visíveis na Bacia do Paraná pode-se observar um marcante padrão de feições lineares em forma de X, podendo ser divididas em três grupos de acordo com suas orientações (NW-SE, NE-SW e E-W). As duas mais importantes são as orientações NW-SE e NE-SW, as quais constituem zonas de fraqueza antigas que foram reativadas durante a evolução da bacia (Zalán *et al.* 1987) (Fig. 2.3.1).

Segundo Zalán (*op cit.*), as falhas de direção NE-SW são geralmente constituídas por uma única falha larga ou uma zona de falha retilínea, com freqüentes evidências de movimentações transcorrentes. Já os diversos lineamentos de direção NW-SE estão normalmente preenchidos por diques de diabásio do arqueamento de Ponta Grossa, relacionados ao vulcanismo fissural continental da Bacia do Paraná.

As formações pertencentes ao Grupo São Bento têm densidade baixa de fraturamento, não apresentando um padrão definido. As fraturas têm pequenas aberturas apresentando descoloração devido à lixiviação. São geralmente de persistência e regularidade variáveis.

O lineamento mais importante da região, denominado de lineamento do Rio Iguaçu, possui orientação preferencial noroeste, comumente tendo formado linhas de fraqueza controlando as direções preferências das drenagens.

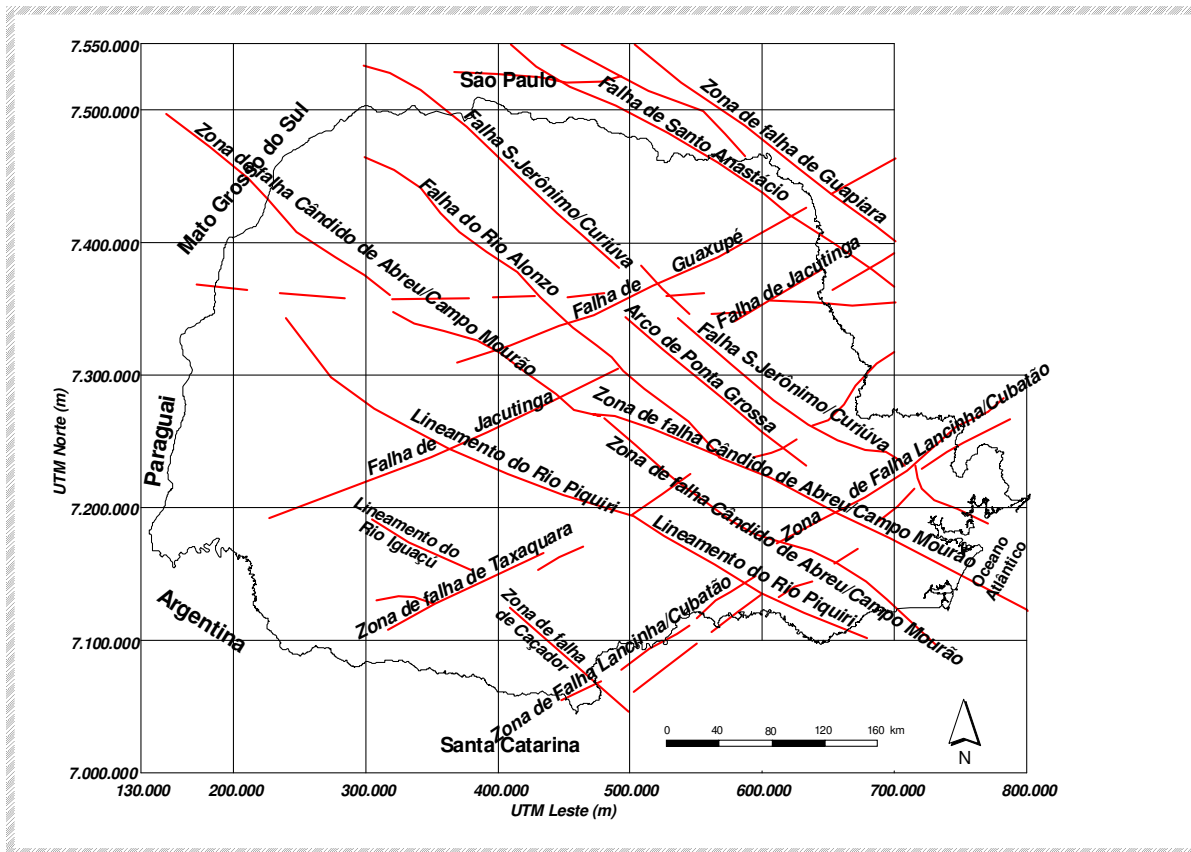


Figura 2.3.1: Arcabouço Estrutural do Estado do Paraná, evidenciando as principais estruturas. (mod. Zalán et al. 1987).

Os falhamentos normais constituem o principal tipo de estrutura rúptil detectado na região. Apresentam, normalmente, faixa cataclástica bem definida. Nos basaltos desenvolve-se, geralmente, uma zona bastante densa de fraturas devida ao fraturamento conjugado, o qual forma duas famílias de juntas, oblíquas entre si nas vizinhanças dessa faixa cataclástica.

As feições estruturais mais importantes da região em questão estão relacionadas às linhas de extensos fraturamentos dispostos segundo a direção preferencial NE e subordinadamente NW. Nos estudos de hidrelétricas do rio Iguaçu, a presença de falhamentos mais importantes, relacionadas a estas feições foram observadas, segundo as direções $N50^{\circ}/70^{\circ}W$ e $N50^{\circ}/70^{\circ}E$ (Levis et al, 1998).

Em linhas gerais, fatores estruturais afetam de duas maneiras a evolução da topografia da rede de drenagem regional, como peculiar em terrenos basálticos: fraturas tectônicas de maior porte (grandes fraturamentos existentes na superfície do terreno) controlam e direcionam o desenvolvimento lateral dos corpos d'água e estão diretamente relacionados às suas sinuosidades morfológicas ao mesmo tempo em que os planos de contatos interderrames são responsáveis pelo desenvolvimento de encostas em degraus que quando avançados aos corpos de água propiciam o aparecimento de desníveis em forma de corredeiras, saltos e cachoeiras nos leitos dos rios devido às ações erosivas. As cachoeiras esculpidas em basalto em geral mostram quedas verticais, devido ao fraturamento em forma de colunas, comuns a estas rochas.

Nos rios mais importantes, como o Iguaçu, a força da erosão durante esse tempo arredondou as suas curvas. Os rios menores ainda mantêm uma conformação angulosa, estreitamente relacionada com o padrão do fraturamento local. A morfologia de Salto Caxias é muito peculiar, formada pela ocorrência de uma grande volta do rio Iguaçu, posteriormente seccionada de maneira a originar a conformação atual.

2.4 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

Os ensaios realizados em testemunhos de sondagem indicaram para a região da UHE Salto Caxias uma predominância de rochas efusivas básicas toleíticas.

Perfis levantados ao longo de linhas das principais estruturas do projeto de Salto Caxias apresentam a seqüência de derrames entre as elevações 340,00 e 200,00.

Segundo Levis *et al* (1998), com base nos testemunhos de sondagem foram constatados 5 derrames sub-horizontais, designados de cima para baixo de D1, D2, D3, D4 e D5 (Fig. 2.4.1).

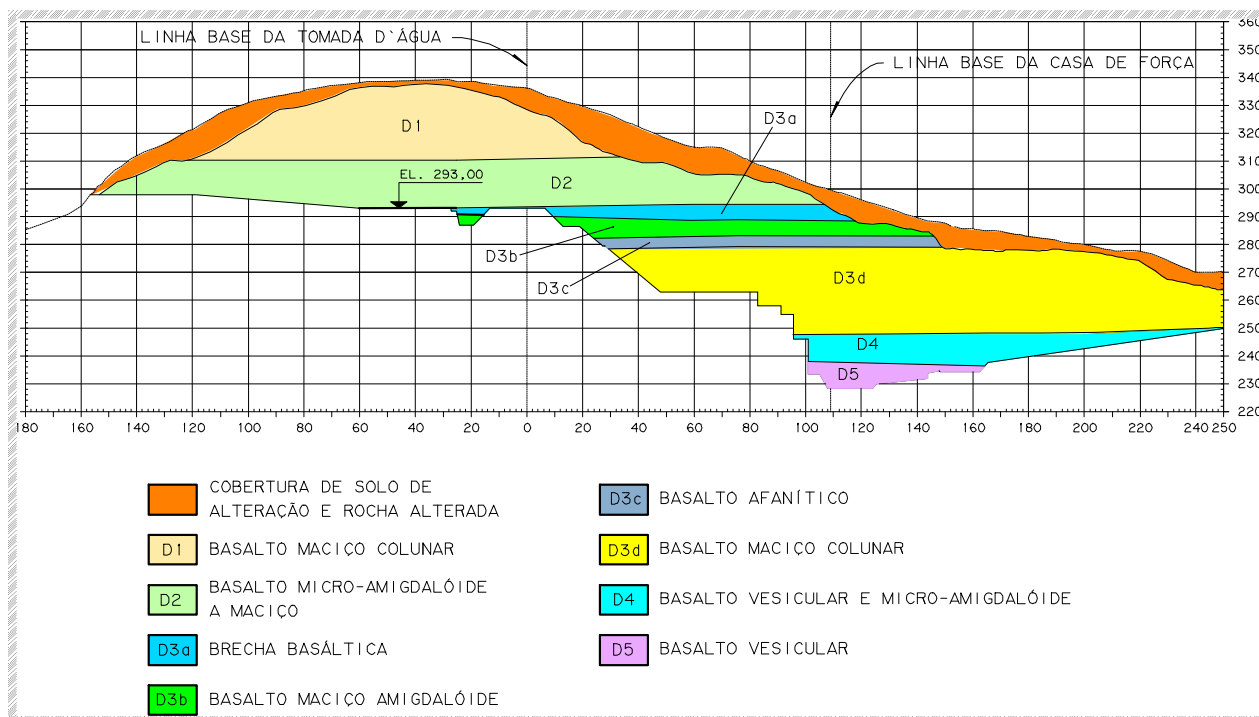


Figura 2.4.1: Perfil geológico ao longo da linha base do circuito de geração (Levis et al, 1998)

O derrame D1 tem espessura superior a 40 metros, a maior parte constituída por basalto maciço, representando um alto topográfico mais resistente com pouca cobertura de solo. Próximo à superfície, este basalto é coberto por uma camada espessa de saprolito e de rocha parcialmente alterada ao longo das fraturas colunares, com espessura de até 15 metros.

Com cerca de 15 de espessura, o derrame D2 é constituído por basaltos vesículo-amigdalóides no topo, e basalto micro-amigdalóide a maciço, pouco fraturado. Ensaios de durabilidade indicaram se tratar de material suscetível à desintegração.

No derrame D3, com espessura variando entre 40 a 50 metros, ficaram situadas as estruturas mais importantes da obra, inclusive a fundação da barragem, no leito do rio. Ele apresenta uma porção superior de brecha basáltica avermelhada, porosa, uma camada de basalto maciço com amígdalas esparsas, um horizonte delgado (4 m de espessura) de basalto maciço afanítico, sobreposto a uma descontinuidade do tipo junta-falha (descontinuidade D3), e, finalmente, uma camada basal espessa de basalto maciço colunar. Este derrame ocorre

desde aproximadamente a cota 280,00, nas ombreiras, até aproximadamente uns 10 a 15 m abaixo do leito do rio.

O derrame D4 é pouco espesso, formado por basalto vesicular e micro-amigdalóide, enquanto que o derrame D5, finalmente, com espessura acima de 40 metros é formado por basalto vesicular, localmente brechado, na porção superior, seguido por basalto micro-amigdalóide e basalto maciço.

Segundo Levis *et al* (1998), na região de Salto Caxias foram encontradas algumas feições, atectônicas significativas que tiveram influência no projeto e construção:

- I. os contatos entre derrames, que, em sua maioria apresentavam-se abertos e com grandes perdas de água;
- II. o fraturamento colunar dos basaltos maciços fraturamento sub-horizontal do basalto maciço que forma o leito do rio, na margem esquerda, originada por descompressão erosiva, e
- III. a descontinuidade D3, uma zona fraturada sub-horizontal, alterada, muito extensa e permeável, do tipo junta-falha. Algumas lineações tectônicas ocorrem no local, uma próxima à margem esquerda, cortando a fundação da barragem no sentido jusante-montante. Um canal mais profundo encontrado na margem direita não mostrou evidências de um controle tectônico.

As características geológicas mencionadas influenciaram bastante o projeto e a construção da obra, afetando principalmente a escavação e limpeza de fundação, a utilização do basalto como agregado para concreto o tratamento das fundações.

A fundação da barragem de concreto-gravidade de Salto Caxias ficou inteiramente situada em rochas basálticas sãs e resistentes.

3. FUNDAMENTOS DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

A prospecção geofísica trata da detecção não invasiva e por consequência de interpretação indireta, em subsuperfície de corpos ou estruturas que apresentem algum tipo de contraste em uma ou mais propriedades físicas com o meio que o circunda.

Em nível de detalhe, os métodos geoeletricos que calculam a resistividade dos materiais, a fim caracterizar zonas condutoras que podem refletir fraturamento, alteração e mesmo vazios preenchidos por água e/ou lama.

Por se tratar de uma referência mundial, trabalhos como de Ward (1990), Telford *et.al.* (1990) e Orellana (1972) serviram de embasamento bibliográfico para a maior parte deste capítulo, embora outras publicações também tenham sido consultadas.

3.1 BASE TEÓRICA DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

- **A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DAS ROCHAS**

Condutividade elétrica diz respeito à facilidade (sua recíproca, resistividade, refere-se à dificuldade) com que a corrente elétrica se propaga num meio qualquer. A condução elétrica em sedimentos e rochas próximas à superfície é basicamente eletrolítica, ao longo de poros interconectados. Os íons que conduzem a corrente resultam da dissociação de sais na água. A salinidade das águas de percolação é dos fatores mais determinantes da condutividade elétrica de uma rocha ou sedimento.

Quanto maior a porosidade, maior a quantidade de água que pode percolar o meio e maior a quantidade de íons livres para se movimentar na água que preenche os poros.

A textura da rocha ou sedimentos é um forte condicionante da resistividade elétrica do meio. Um arenito bem selecionado (grãos de igual tamanho) apresenta maior volume de espaços vazios para percolação pelo eletrólito de formação e

desta maneira, menor resistividade. Um arenito mal selecionado apresenta menor porosidade e, conseqüentemente, maior resistividade.

Um fator importante para a prospecção geoeletrica é o efeito dos minerais de argila sobre a eletroresistividade. As partículas de argila constituem um caminho adicional de condução de corrente elétrica, além do caminho pelo eletrólito. A resistência deste caminho adicional é muito baixa. A razão para esta alta condutividade está na dupla camada de cátions dos minerais de argila. Uma das camadas catiônicas, adjacente à superfície do mineral, é *fixa*; a outra, *camada difusa*, apresenta um decréscimo exponencial de densidade com a distância a partir da camada fixa. A camada difusa de cátions, ao contrário da fixa, é livre para se movimentar sob a influência de um campo elétrico. A adição dos cátions da camada difusa à concentração iônica normal aumenta a densidade global dos transportadores de carga. O resultado final é um aumento na condutividade do meio. Este efeito dos minerais de argila é muito significativo, devido à grande capacidade de troca iônica destes minerais.

Mesmo em áreas não sedimentares, a condutividade dos sedimentos é importante ao menos para caracterizar a cobertura sobreposta às rochas cristalinas que constituem o embasamento. O nome embasamento refere-se tanto ao uso geológico, para caracterizar um substrato mais antigo, como ao uso geofísico, para caracterizar o embasamento geoeletrico, eletricamente contrastante e muito espesso com relação às camadas sobrepostas. Nem sempre o embasamento geológico para um determinado problema prospectivo coincide com o embasamento geoeletrico. Anomalias de condutividade (estruturas condutoras) podem ocorrer em rochas não permeáveis como rochas graníticas e calcárias, devido a zonas de fraturamento por onde a percolação se torna possível, ou em conseqüência de dissolução nas rochas calcárias. Tais estruturas podem se caracterizar em problemas para a engenharia e meio ambiente ou podem se constituir em aquíferos importantes para captação de águas subterrâneas, ou ainda são alvos de interesse à prospecção mineral.

- O PARÂMETRO RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Os métodos de eletrorresistividade medem uma impedância, cuja interpretação permite avaliar a distribuição da resistividade elétrica no subsolo e conseqüentemente, a geologia de subsuperfície. Uma corrente é injetada no solo entre dois eletrodos e a voltagem é medida entre dois outros eletrodos. A razão entre a voltagem medida e a corrente transmitida é entendida como a impedância da porção da terra através da qual a corrente se propaga.

Segundo Ward (1990), e com referência à figura 3.1.1, considere-se um espaço homogêneo sendo energizado por um eletrodo posicionado na origem do sistema de coordenadas. Em qualquer superfície esférica S , à distância r da origem, a corrente flui radialmente. Uma vez que a superfície S tem área igual a $4\pi r^2$, a densidade de corrente à distância r é,

$$J_r = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (\text{III.1})$$

A lei de Ohm, $J = \sigma E$, com $\rho = 1/\sigma$, pode ser escrita na forma:

$$E_r = J_r \rho = \frac{I\rho}{4\pi r^2} \quad (\text{III.2})$$

O potencial (ou voltagem) V à distância r do eletrodo é dado pela integral de E_r entre r e o infinito,

$$V \int_r^\infty E_r dr = \frac{I\rho}{4\pi r} . \quad (\text{III.3})$$

Se o eletrodo está na superfície de um semi-espço, a corrente flui radialmente através de um hemisfério de raio r , e área de superfície $2\pi r^2$. Então a densidade de corrente para um eletrodo num semi-espço homogêneo é

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2}, \quad (\text{III.4})$$

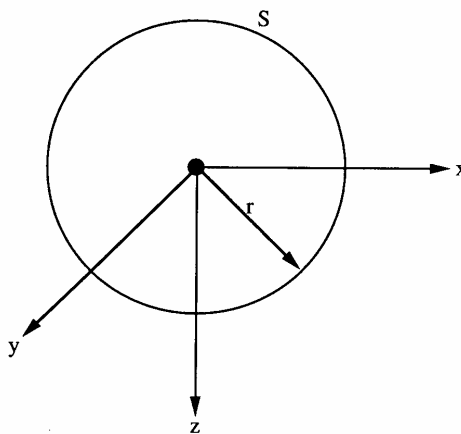


Figura 3.1.1: Eletrodo na origem do sistema de coordenadas. S é a superfície da esfera de raio r .

e o potencial, relação fundamental para todas as técnicas de eletrorresistividade na superfície da terra, é

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}. \quad (\text{III.5})$$

Na realidade, precisa-se de dois eletrodos para transmitir a corrente para o solo; por um deles a corrente entra e pelo outro sai do solo, fechando circuito, como ilustrado na figura 3.1.2. Nesta figura, A e B são os eletrodos de corrente, enquanto M e N são os eletrodos de potencial, entre os quais se mede uma

diferença de potencial ΔV . O potencial medido no eletrodo M devido à corrente entrando em A e saindo via B é

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right]; \quad (\text{III.6})$$

nesta equação, o sinal *menos* no segundo termo leva em conta a troca de sinal da corrente no eletrodo B, r_{AM} é a distância entre A e M, e r_{BM} é a distância entre B e M.

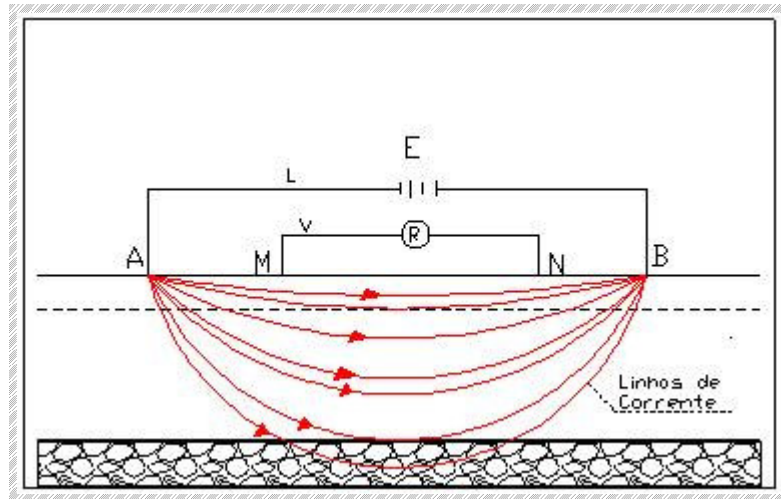


Figura 3.1.2: Desenho esquemático da transmissão de corrente elétrica pelo solo.

Na prática, mede-se uma diferença de potencial entre dois pontos como entre M e N. Esta diferença de potencial para qualquer arranjo de eletrodos na superfície pode ser expressa como:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} - \frac{1}{r_{AN}} \right], \quad (\text{III.7})$$

em que r_{BN} e r_{AN} são as distâncias entre o eletrodo de potencial N e os eletrodos de corrente B e A respectivamente. A resistividade do semi-espço é então dada por:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot K, \quad (\text{III.8})$$

Desta maneira temos que:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) + \left(\frac{1}{r_{BN}} - \frac{1}{r_{AN}} \right) \right]} \quad (\text{III.9})$$

Sendo I a corrente, ΔV a diferença de potencial medida, e K o fator geométrico, que depende do arranjo específico de eletrodos.

A resistividade de um semi-espço homogêneo e isotrópico pode ser calculada pela equação acima, enquanto numa superfície heterogênea e anisotrópica, mede-se uma *resistividade aparente* dada por:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad (\text{III.10})$$

Para um grande número de técnicas ou arranjos eletródicos existe teoria bem desenvolvida para interpretar esta impedância medida e estimar o modelo geoeletrico que a produz. Contudo, a interpretação tem um certo grau de ambigüidade. É necessário incorporar um mínimo de informações geológico/geotécnicas ao processo de interpretação para que o modelo interpretado seja consistente com o modelo geoeletrico real.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS

É conveniente lembrar que dentro da geofísica, os métodos geoeletricos apresentam uma classificação hierárquica própria. Não é incomum a utilização errônea ou inadequada dos termos “método”, “técnica” e “arranjo” devido à não compreensão sobre o assunto.

Autores como Orellana (1972) e Jakubovskii & Liajov (1980, *appud* Braga, 2006), propõem classificações para os métodos geoeletricos a fim de normatizar estas denominações. Neste trabalho adota-se a classificação terminológica proposta em Braga (*op. cit.*), métodos geoeletricos, técnicas de investigação e arranjos de campo.

Desta maneira, o termo método geoeletrico diz respeito ao parâmetro físico obtido (resistividade, cargabilidade, potencial natural). As técnicas de investigação dizem respeito ao suporte prático (*p.e.* exemplo sondagens, caminhamentos, perfilagens etc.) para o desenvolvimento e determinação deste parâmetro. Já os arranjos representam os procedimentos de campo necessários para a execução do serviço (arranjos do tipo pólo-dipolo, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger, entre outros)

Vários são os métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos geotécnicos (geoeletricos, sísmicos e gravimétricos). Dentre os principais métodos geoeletricos (eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo, GPR e eletromagnético) escolheu-se para esta pesquisa o método da eletrorresistividade com arranjo gradiente e o do potencial espontâneo (método de campo natural), descritos a seguir.

3.3 ARRANJO GRADIENTE

A técnica do caminhada elétrico é uma das maneiras de verificar as variações dos parâmetros físicos (método da eletrorresistividade) e está baseada

na interpretação do parâmetro físico investigado (neste caso a resistividade), obtido através de medidas realizadas na superfície do terreno investigada ao longo de um ou mais perfis horizontais e a profundidades determinadas.

O arranjo gradiente consiste de uma linha de transmissão de corrente AB fixa, com medidas efetuadas entre os eletrodos MN, que são deslocados sobre perfis paralelos à linha AB.

A profundidade de investigação cresce com o aumento da distância entre os eletrodos de corrente (AB) e é sempre possível realizar vários gradientes simultaneamente, superpostos, com diferentes extensões de linha AB, (conforme foi executado a partir da segunda etapa de campo).

O espaçamento entre os eletrodos AB e MN deve ser determinado em função dos objetivos do trabalho. Usualmente utiliza-se uma relação AB/MN entre 30 e 40 para assegurar uma razão sinal/ruído satisfatória, preservando ainda razoável resolução lateral. A profundidade de investigação varia de AB/4 em meio resistente, portanto pouco dissipativo, até AB/10 em meio altamente condutor (Fig. 3.2.1).

Os resultados são apresentados em mapas de contorno ou perfis justapostos. As anomalias podem ser interpretadas quanto à posição com boa resolução lateral. A sensibilidade do arranjo é boa para corpos ou feições com continuidade na vertical como se espera da resposta do plano de fissuramento em estudo, mas é pequena para feições horizontais.

O arranjo gradiente tem sido pouco documentado na literatura recente, que traz o caminhamento com dipolo-dipolo, pólo-dipolo e pólo-pólo como as técnicas mais apropriadas para os levantamentos e modelagem 2D e 3D.

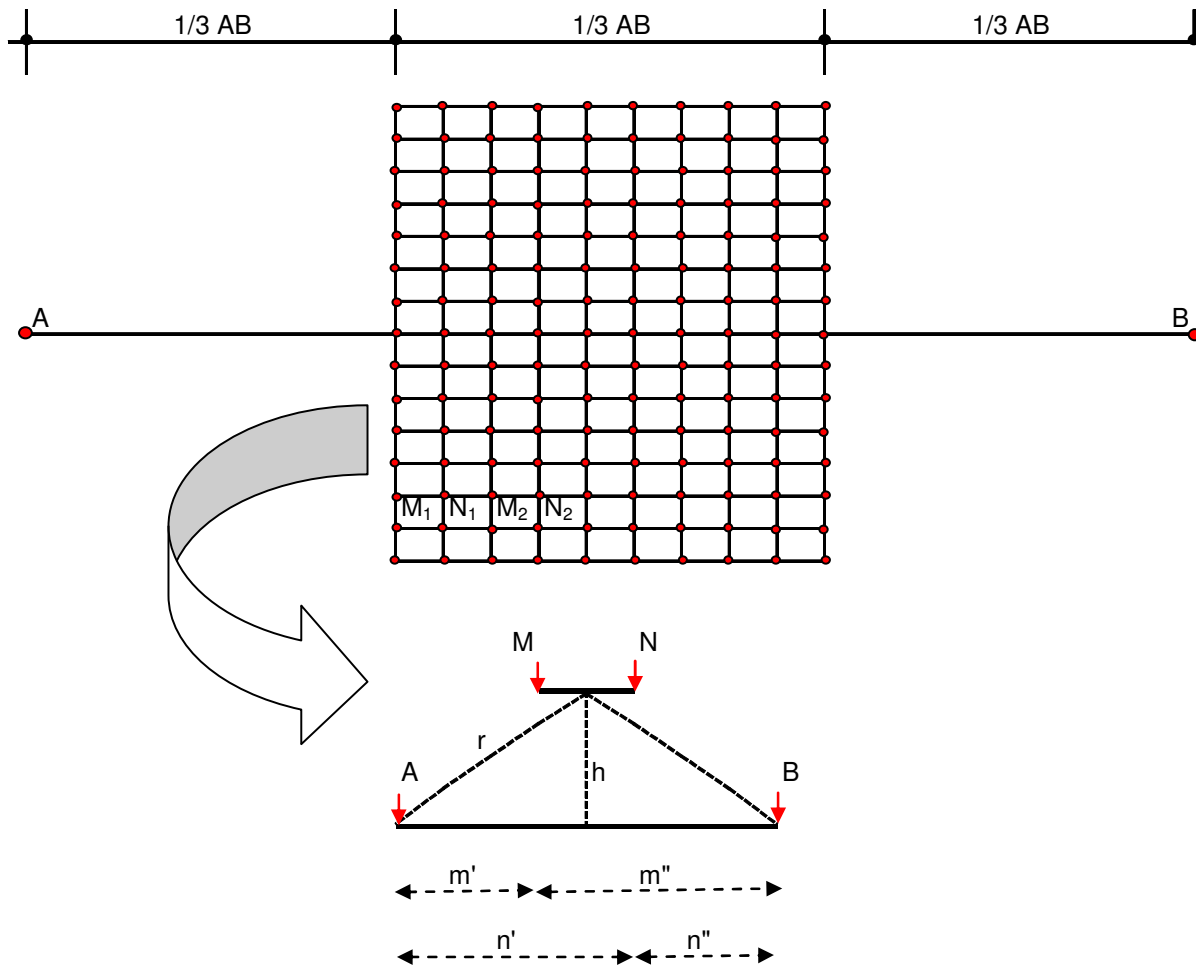


Figura 3.2.1: Mapa esquemático com a disposição dos eletrodos para arranjo gradiente (mod. Braga, 2007).

O cálculo da resistividade aparente neste arranjo é mais envolvente do que com os outros arranjos mencionados acima. Como não foi possível manter um espaçamento regular exato entre linhas, o fator K para cada posição de eletrodos MN e AB foi calculado a partir da expressão geral:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) + \left(\frac{1}{r_{BN}} - \frac{1}{r_{AN}} \right) \right]} \quad (\text{III.11})$$

Para esta pesquisa, os cálculos para o fator K e da resistividade aparente foram realizados através de uma planilha desenvolvida no Excel, automatizando o cálculo das distâncias sobre a rampa de ensaios. Estes cálculos foram checados contra os resultados calculados para algumas linhas no módulo IP Processing and Plotting System do pacote Geosoft® (Geosoft Incorporated, 1994) e *plotados* em mapas de contorno (figuras 3.2.2 a 3.2.5). Estes mapas foram então comparados com a figura 2.9, pg. 24 do livro de J. S. Sumner (Sumner, 1976), uma vez que no método de Polarização Induzida o arranjo gradiente tem tido mais importância do que nas investigações com resistividade apenas. Verifica-se nesta comparação também que o fator K foi calculado corretamente.

Os mapas de contorno do fator K para os diferentes AB utilizados dão uma idéia do comportamento da diferença de potencial (ΔV) a ser medida se pensarmos em um meio homogêneo. O contorno do fator K para o AB=40m (fig. 3.2.2) apresenta uma influência forte do eletrodo de corrente mais próximo, na sua vizinhança, que inclui os cantos do retângulo. Isto mostra que nos aproximamos do arranjo pólo-dipolo ao aproximarmos um dos eletrodos de corrente A ou B.

Nesta figura e nas próximas, o mapa de contorno foi feito a partir de uma malha com tamanho de célula igual a 1 metro. A interpolação a partir de uma distribuição inicial um tanto irregular, impede que o contorno seja exatamente suave e regular, mas aproxima-se bastante disto. Ao analisar a distribuição de K deve-se ter em mente que a diferença de potencial é esperada decrescer com o aumento de K se o meio é homogêneo.

Comparativamente, nas figuras 3.2.3 a 3.2.5 nota-se uma abertura das curvas de contorno do fator K, com aumento gradativo também da suavidade das mesmas. Isto mostra que se ficarmos no 1/3 central do retângulo, temos um comportamento tão suave do campo elétrico que podemos considerá-lo uniforme para a maioria das aplicações do arranjo gradiente.

O arranjo gradiente pode ser utilizado com as medidas se aproximando dos eletrodos de corrente, mas deve-se ter em mente que ao aproximar-se de um dos eletrodos de corrente o arranjo passa a investigar profundidade diferente, ficando mais próximo do arranjo pólo-dipolo.

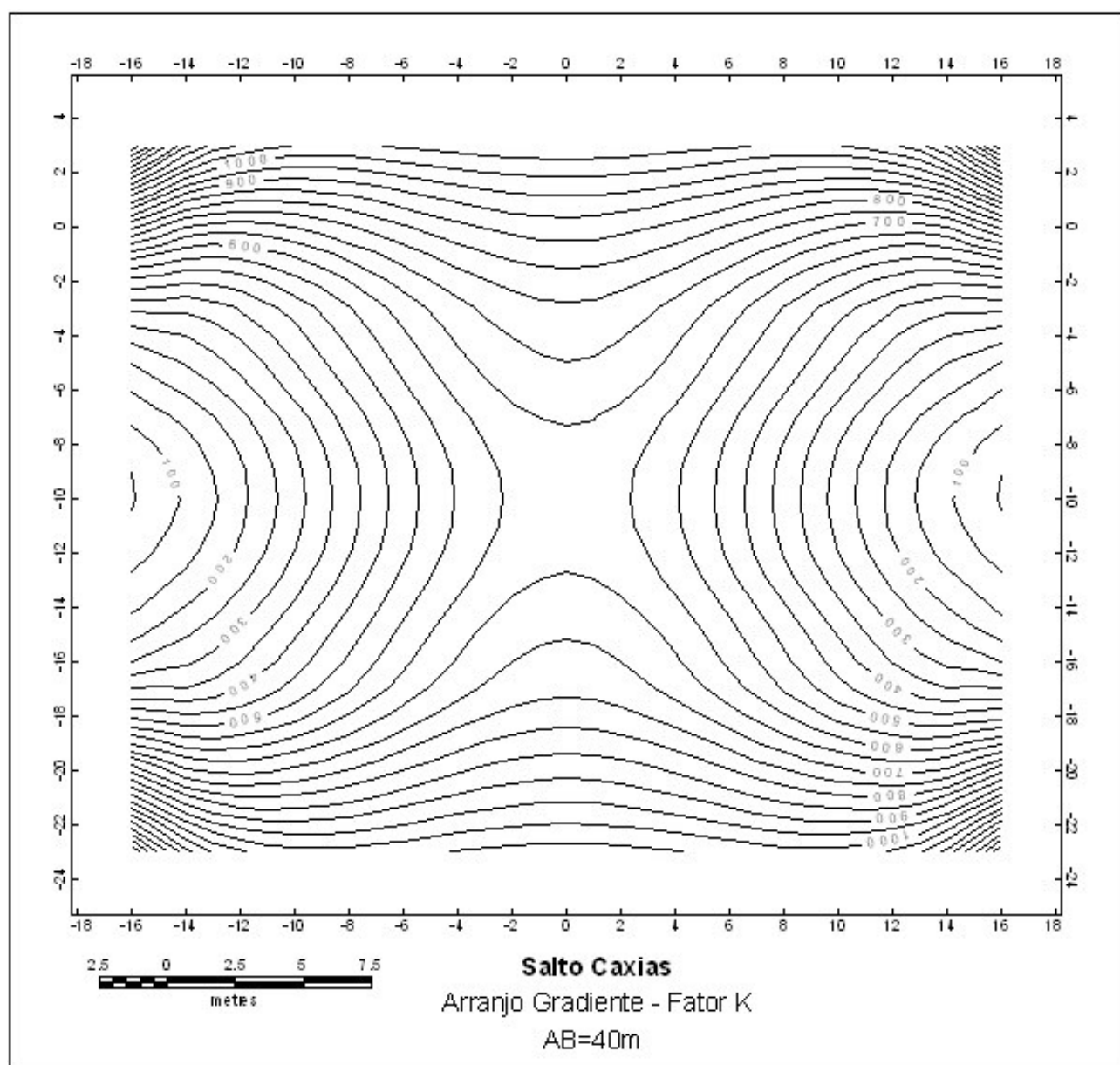


Figura 3.2.2: Fator K para AB=40m.

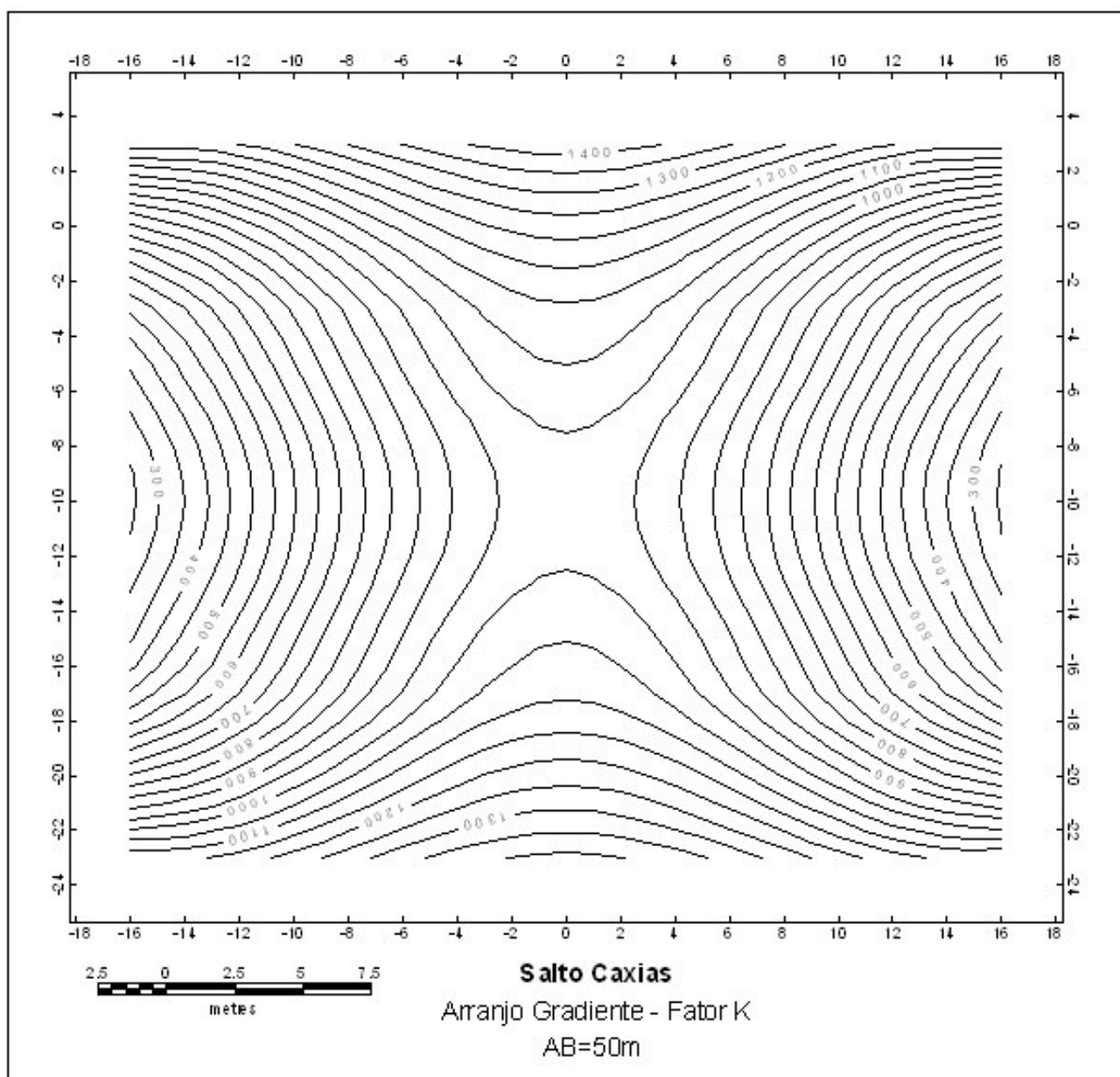


Figura 3.2.3: Fator K para $AB=50m$.

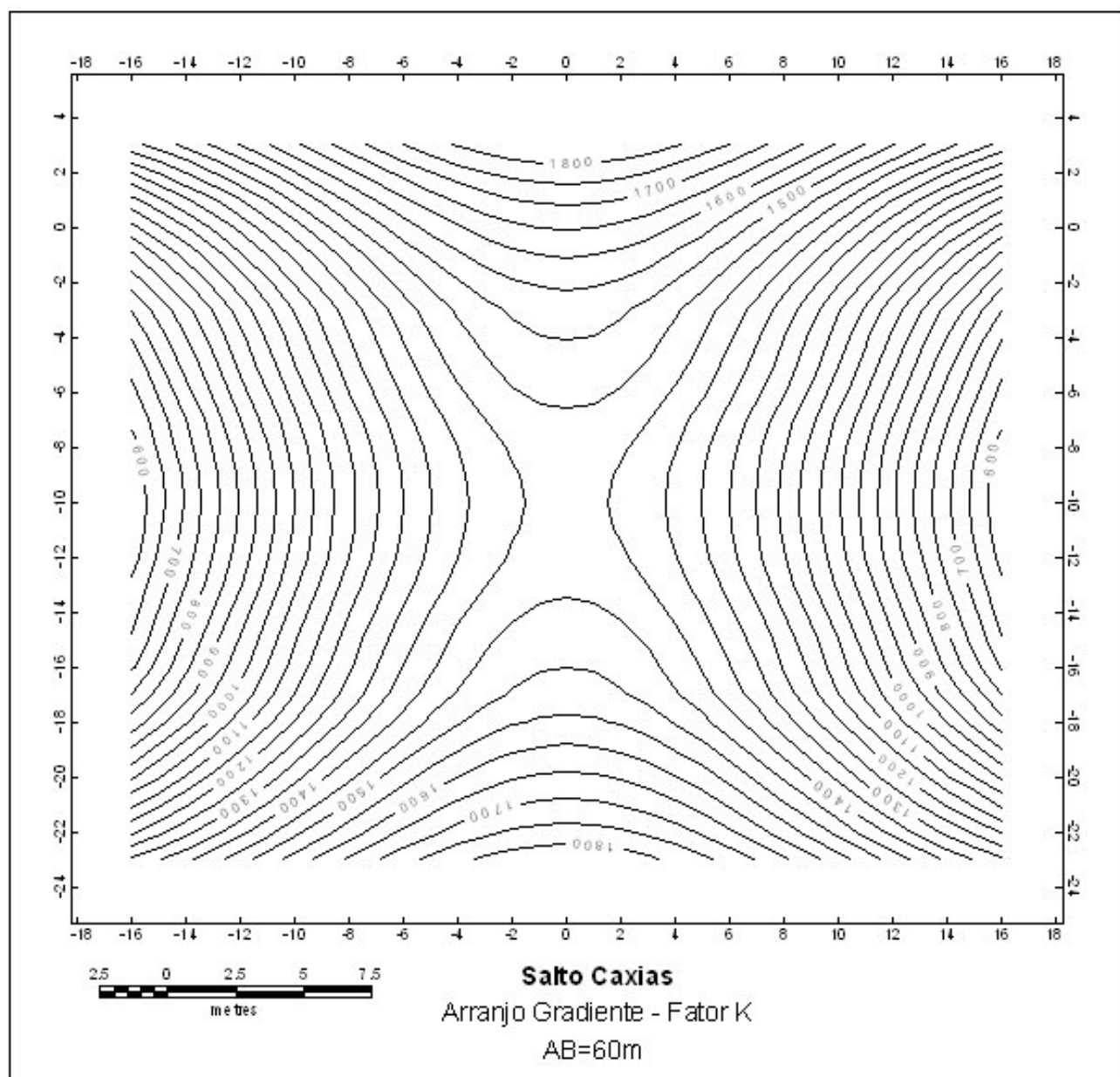


Figura 3.2.4: Fator K para AB=60m.

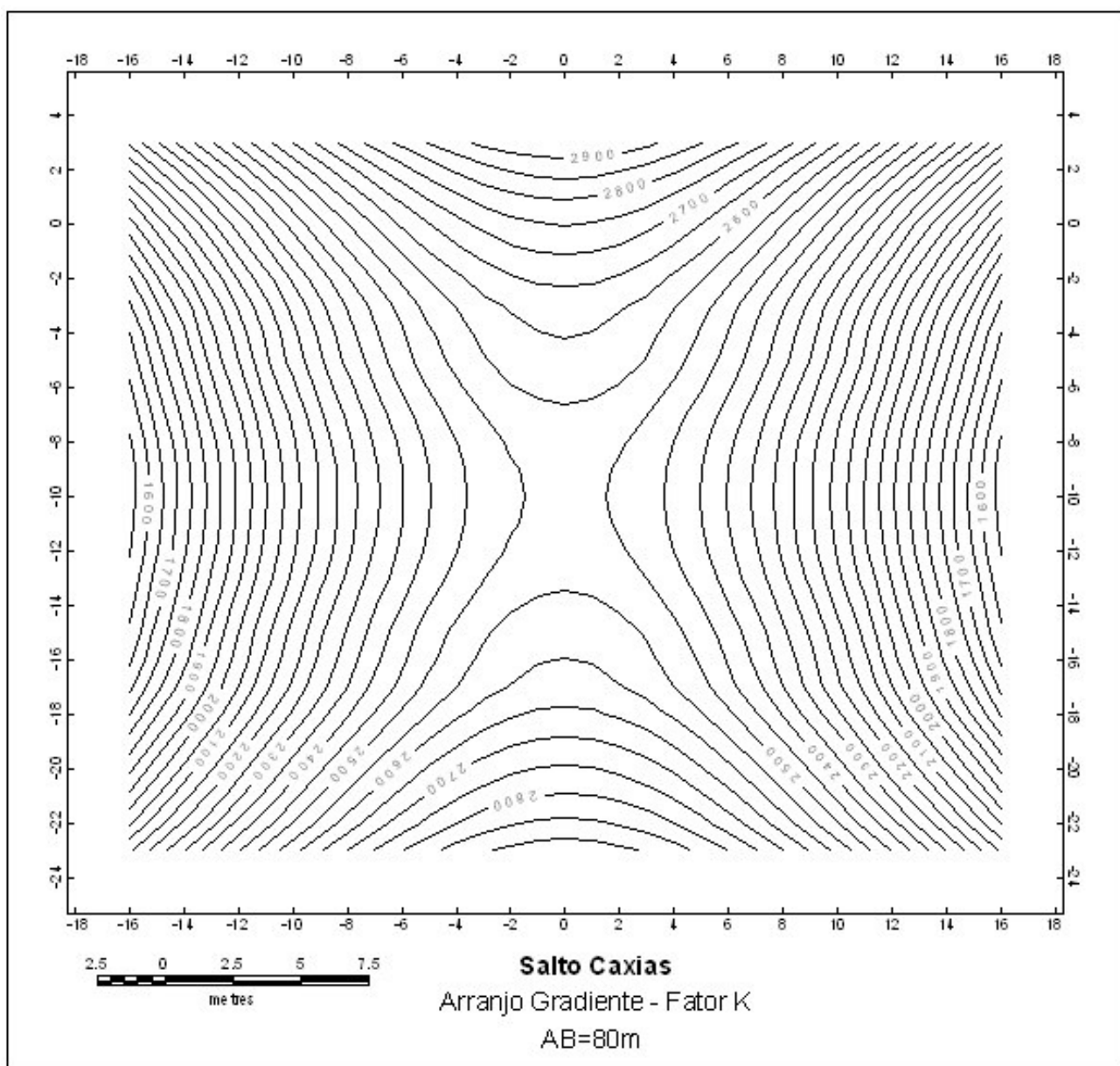


Figura 3.2.5: Fator K para AB=80m.

Os ensaios realizados com arranjo gradiente na barragem de Salto Caxias restringiram-se ao 1/3 central do AB apenas no caso do AB=80m. Contudo, posteriormente, planeja-se utilizar arranjo não convencional, do tipo “general array” no software de modelagem 3D. Porque alguns softwares de modelagem (inversão) 3D requerem malha quadrada com distâncias reais (medidas na horizontal), os valores das coordenadas Y, que se referem às posições das linhas

ao longo dos degraus do talude jusante, são valores quebrados, que representam com muito boa aproximação um espaçamento de 2m entre linhas.

3.4 POTENCIAL ESPONTÂNEO

O método do potencial espontâneo, inicialmente usado em meados do século XIX, constitui uma das mais antigas técnicas de prospecção geofísica e tem sido continuamente aplicado numa grande variedade de problemas de hidrogeologia, geotecnia e prospecção.

O potencial espontâneo, tradução do termo inglês “Self Potential”, (sigla SP) se baseia no fato de que mesmo na ausência de qualquer campo elétrico criado artificialmente, é possível medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos dispostos no terreno, que pode variar de alguns milivolts até algumas dezenas de milivolts.

A medida SP necessita de eletrodos impolarizáveis, voltímetro com alta impedância de entrada (≥ 10 megaohms) e fios condutores isolados que conectam os eletrodos aos terminais do voltímetro (fotos 3.3.1 e 3.3.2).

A principal vantagem na utilização do método SP é seu baixo custo, bem como sua simplicidade de operação em campo.

As anomalias de SP de importância para a engenharia, geotecnia ou estudos ambientais, são geradas pelo fluxo de líquidos, fenômeno explicado pela eletrocinética. O fluxo de água subterrânea é o agente mais importante no mecanismo de geração de SP. Desta maneira o potencial espontâneo está condicionado ao movimento de água em subsuperfície ou através das descontinuidades das rochas, fontes de potencial eletrocinético (Gallas, 2005).

A origem do fenômeno eletrocinético está associada com a formação de uma dupla camada de cargas elétricas nas paredes dos poros do corpo saturado que geram uma corrente elétrica por convecção (Medeiros & Lima, 1999).

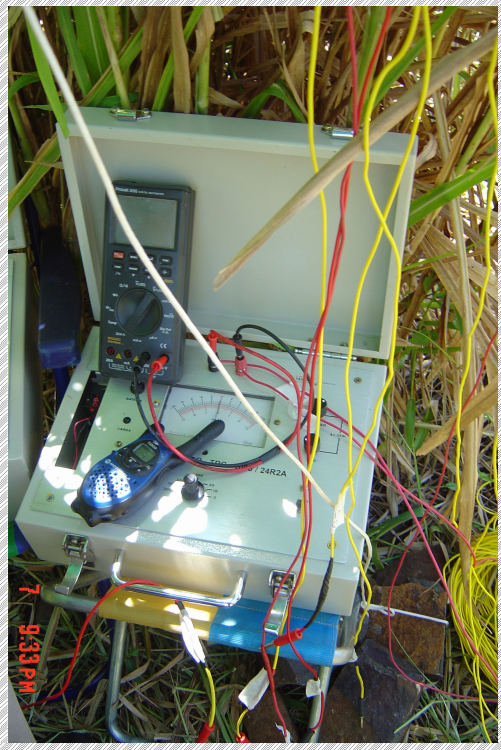


Foto 3.3.1: Equipamento para determinação de SP e resistividade.



Foto 3.3.2: Eletrodos não polarizáveis (potes cerâmicos) usados no SP e resistividade.

São dois os tipos de potenciais de fluxo responsáveis pela movimentação dos eletrólitos e geração do campo elétrico: “per ascensum” e “per descensum”. (Schlumberger, 1929 *apud* Orellana, 1972)

O fluxo “per descensum” ocorre quando a água que percola ao longo das falhas/fraturas das rochas ou através da rede de capilaridade (porosidade+conectividade) dos terrenos/materiais permeáveis, tende a arrastar cátions, o que gera uma diferença de potencial responsável por anomalias positivas em locais saturados e anomalias negativas em locais de pouca saturação. Anomalias de SP causadas por fluxo “per descensum” são amplamente usadas para a determinação de vazamentos de água em barragens ou contaminações do lençol freático.

O ensaio de SP pode ser realizado através do arranjo dos gradientes (não confundir com arranjo gradiente da resistividade) ou por meio de base fixa (técnica dos potenciais).

A arranjo dos gradientes consiste em medir a diferença de potencial entre dois eletrodos que se movem ao longo de um perfil/linha. Apresenta vantagens como rapidez de execução e redução dos efeitos indutivos devido ao pequeno comprimento dos cabos. Em contrapartida apresenta desvantagens como erro cumulativo causado por possíveis polarizações dos eletrodos (Gallas, 2005).

A arranjo de base fixa consiste em manter um eletrodo fixo numa estação-base enquanto outro eletrodo é deslocado ao longo da linha. A grande vantagem desta técnica é a diminuição de possíveis erros cumulativos, porém exige uma quantidade de cabo com extensão maior que o perfil a ser levantado (Gallas, 2005).

Ruídos em levantamentos de SP podem ser causados por diferenças nas condições de contato eletrodo/solo, a polarização dos eletrodos, oscilações/variações climatológicas e as condições dos fios, cabos e potes utilizados. Para eliminar ou reduzir estes ruídos deve-se fazer uma checagem prévia das condições de uso dos cabos e equipamentos, além de garantir uma estabilidade entre os eletrodos, mantendo-os interligados e imersos em solução de sulfato de cobre e fazendo medidas de “ddp” entre eles, no início e final dos trabalhos, ou quando se achar necessário.

A aplicação de “filtros” durante o tratamento dos dados obtidos em campo também auxilia na suavização dos ruídos persistentes.

4. AQUISIÇÃO GEOFÍSICA

Este capítulo apresenta os procedimentos e os resultados dos ensaios geofísicos realizados durante as quatro etapas de campo realizadas no período de dezembro de 2006 a setembro de 2007.

4.1 ESCOLHA DO ARRANJO E ÁREA DE ESTUDO

Existem diversos métodos geoeletricos que podem ser utilizados nos levantamentos, dependendo dos objetivos do estudo. A escolha do arranjo depende dos propósitos do levantamento e do tipo e qualidade da informação desejada. Porém, independentemente dos objetivos do levantamento, é fundamental garantir confiabilidade nos dados obtidos e na sua interpretação, já que esta por se tratar de uma modelagem matemática, não apresenta solução única.

No caso deste trabalho, o objetivo é determinar metodologia(s) capaz(es) de detectar descontinuidades (fraturas ou fissuras) com percolação de água no maciço de concreto e, se possível, avaliar as zonas saturadas no seu interior.

A água é o fator determinante da condutividade da crosta terrestre. É esperada ser também o fator determinante da condutividade no concreto, supondo baixa a concentração de ferro utilizado na construção, como é o caso do concreto utilizado na rampa jusante da barragem da UHE Salto Caxias. Assim sendo, os métodos elétricos, envolvendo resistividade e potencial espontâneo (SP), mostram-se os mais indicados para estudos como o presente. Utilizou-se o SP com o objetivo de mapear possíveis caminhos preferenciais da água, enquanto que os ensaios de resistividade forneceram informação sobre grau de saturação (conteúdo em água) no corpo da barragem, reforçando também a indicação de caminhos preferenciais de fluxo.

Para a resistividade, foi escolhida técnica do caminhamento elétrico com o arranjo gradiente. Uma vez que necessita apenas de um par de eletrodos de

corrente para cada nível (profundidade) de investigação, foi o escolhido como arranjo eletródico mais prático e mais adequado para mapeamento de variações laterais de resistividade.

Através da equação derivada no item 3.2 calcula-se a resistividade aparente para cada estação de medida.

A primeira impressão tida ao se observar a face de jusante da barragem da UHE Salto Caxias, é de que seria muito difícil conseguir um contato elétrico satisfatório entre os eletrodos e o concreto do corpo da barragem, pois fora das zonas de fraturas, visualmente, o concreto apresentava-se com uma aparência muito seca como se pode comparar entre as áreas de detalhe (zona de fissuras, com coloração mais escura) e o restante da barragem (coloração mais clara) nas fotos 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4.



Foto 4.1.1: Vista de jusante Barragem da UHE Gov. José Richa. Os retângulos vermelhos marcam as zonas de fissuras dos blocos B5, B8 e B11, da esquerda para direita. Fotografia por satélite obtida pelo site www.wikimapia.org. Acesso em 30/11/06.



Foto 4.1.2: Barragem da UHE Gov. José Richa. Zona de fissura do bloco B5. Vista jusante.

Por se tratar de um concreto de baixo consumo (conteúdo) de cimento por metro cúbico, o concreto compactado com rolo (CCR), utilizado na barragem, apresenta um coeficiente de permeabilidade maior que o coeficiente dos concretos tidos como convencionais, o que possibilita uma relativa “facilidade” na percolação de água/fluídos pelos seus poros. No caso da barragem da usina Gov. José Richa (Salto Caxias), durante o período de construção, o valor médio para o coeficiente de permeabilidade foi da ordem de 10^{-9} m/s para o concreto CCR e 10^{-12} m/s para o concreto convencional usado na face de montante. Em 2005, ensaios realizados em testemunhos de CCR, extraídos de furos de sondagem no bloco B11, apresentaram resultados médios na ordem de 10^{-11} m/s (Portela *et al*, 2006). Conforme anteriormente citado, um aumento no conteúdo de água de uma rocha ou na salinidade desta, acarreta em uma diminuição de sua resistividade. A Lei de Archie (Archie, 1942, *appud* Gallas *et al* 2005), formulada através de uma serie de experimentos realizados em arenitos, revela que a resistividade de uma rocha não depende somente da quantidade de água presente nos poros da mesma, mas também da própria resistividade desta água, da porosidade efetiva do meio e dos índices de cimentação e de saturação.

A aplicação da lei de Archie para a correlação da resistividade do concreto com sua permeabilidade demandaria pesquisas mais aprofundadas, as quais fugiriam do objetivo principal deste estudo.



Foto 4.1.3: Barragem da UHE Gov. José Richa. Zona de fissura do bloco B8. Vista jusante.



Foto 4.1.4: Barragem da UHE Gov. José Richa. Zona de fissura do bloco B11. Vista jusante.

A área de estudo escolhida foi a região entre os blocos B10, B11 e B12, privilegiando desta forma, a zona de fissura do bloco B11, que visualmente, apresentava uma das piores condições (foto 4.1.5).

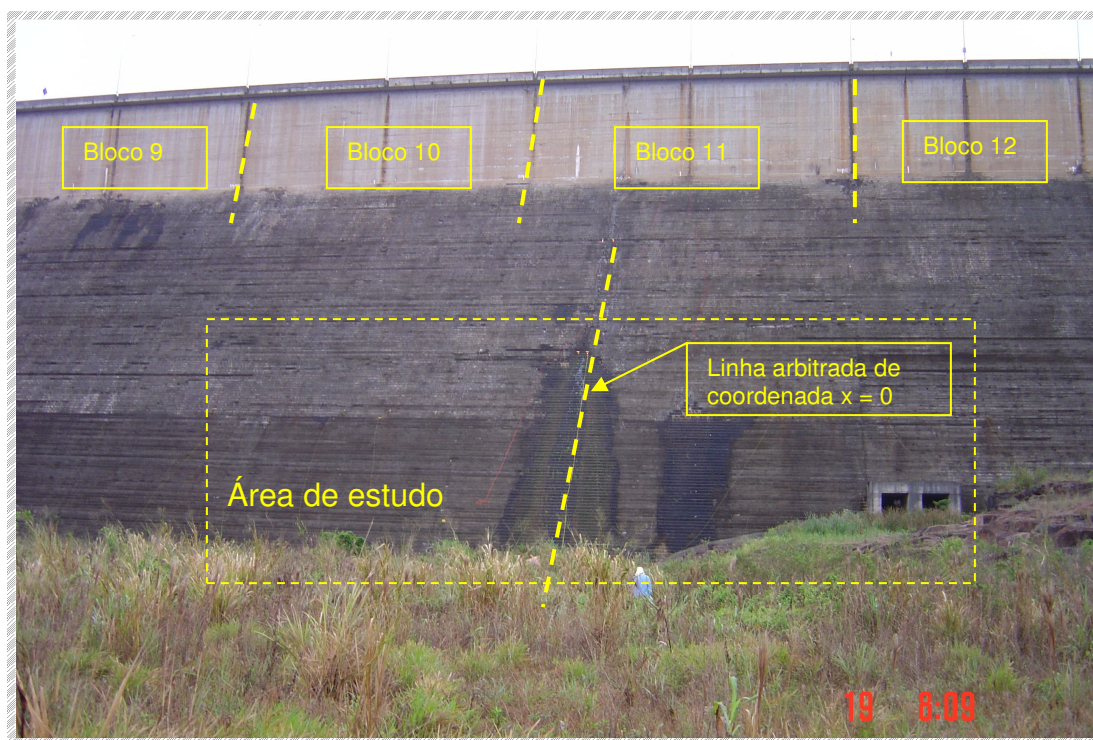


Foto 4.1.5: Área de estudo na rampa jusante da UHE de Salto Caixas (zona de fissura do Bloco B11).

A dificuldade esperada para os ensaios de resistividade devido à alta resistência de contato concreto-eletrodos, revelou-se menos crítica do que se imaginava. Devido à maior permeabilidade do concreto CCR (quando comparada à permeabilidade do concreto convencional), e a constante saturação do maciço de concreto, e ainda uma certa criatividade na instalação de eletrodos (descrito a seguir, na página 48), foi possível a transmissão de corrente que possibilitou medidas confiáveis de diferença de potencial.

Os degraus de jusante, de maneira geral, serviram como linhas de ensaio para os métodos geoeletricos. A linha tracejada que acompanha a faixa escura na foto 4.1.5, foi assumida como linha de coordenada $x = \text{zero}$. A partir de pontos

amarrados e georreferenciados utilizou-se trena para determinar as estações/pontos de medidas.

4.2 PRIMEIRA CAMPANHA DE CAMPO

Monitoramentos constantes realizados pela equipe da Copel, indicam que o fluxo de água pelas fissuras aumenta no período de inverno, uma vez que, devido à diminuição da temperatura ocorre uma retração do maciço de concreto e diminui no verão, quando as temperaturas elevadas propiciam uma relativa expansão no maciço, diminuindo desta forma a infiltração. Desta maneira optou-se por realizar os levantamentos nestas épocas.

A primeira etapa de levantamentos de campo foi realizada entre os dias de 04 e 08 de dezembro de 2006.

Neste período o nível do reservatório oscilou entre as elevações 324,35 e 324,59, representando uma pressão de aproximadamente 60,47 mca (metros de coluna de água), pois a base do reservatório encontra-se na elevação 264,00 (estimada). O clima apresentava-se estável, com sol e a temperatura variando de 25 °C a 40 °C.

Numa primeira análise optou-se pelos métodos geoelétricos para o estudo, por se tratar de uma estrutura de concreto. A hipótese de usar métodos sísmicos (refração) e eletromagnéticos (GPR), inicialmente cogitada, foi descartada, por causa da dificuldade e alto custo dos primeiros e ausência de contraste de condutividade elétrica e constante dielétrica para os segundos. O GPR apresenta também outras razões de dificuldade operacional, pois os degraus estreitos e irregulares e a alta inclinação da rampa de jusante dificultam o caminhar com as antenas do equipamento.

O contato iônico é a alternativa que pode viabilizar ensaios geoelétricos no concreto. Utilizaram-se potes cerâmicos com certa porosidade, contendo solução de sulfato de cobre, como é usual nos levantamentos de SP e Polarização Induzida (IP).

da ordem de $\text{mega}\Omega$, as medidas de SP apresentaram razoável repetibilidade, traduzindo-se em precisão aceitável.

Uma vez que o contato concreto-eletrodos de cerâmica foi satisfatório, efetuou-se também um teste com o arranjo gradiente, instalando-se os eletrodos de corrente nos extremos da linha central da fissura (linha tracejada na faixa escura da foto 4.1.5 e linha L 0 da foto 4.2.2).

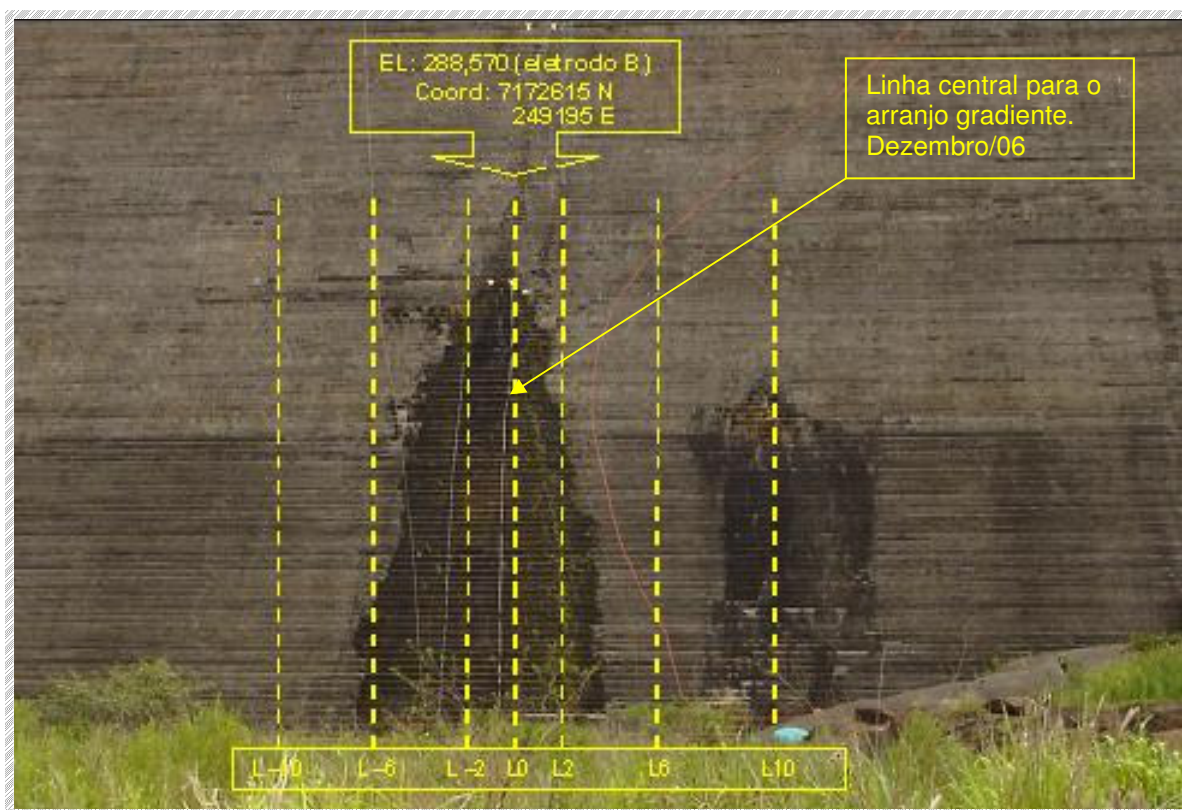


Foto 4.2.2: Disposição das linhas de ensaio para o arranjo gradiente realizado em dezembro/06.

Para melhorar a chance de se ter uma corrente satisfatória, o eletrodo da parte inferior (A) foi instalado logo fora do corpo da barragem, constituído por três estacas metálicas cravadas na fina cobertura de solo ali presente. O eletrodo de corrente (B) instalado na parte superior também foi constituído por 3 estacas metálicas, mas que ficaram deitados numa poça d'água com sal sobre o degrau.

Mais 6 linhas de ensaio foram definidas, sendo 3 linhas (L-2, L-6 e L-10) distanciadas em 2 metros, 6 metros e 10 metros à esquerda da linha central L0, e outras 3 (L2, L6 e L10) dispostas simetricamente à direita de L0.

Novamente, para surpresa da equipe, a possibilidade de corrente foi superior à que se fazia necessária, utilizando-se sempre menor corrente da que seria possível com o transmissor de 1000 watts de potência que estava sendo utilizado.

O teste com arranjo gradiente teve uma extensão de linha de corrente (AB) de 34m, enquanto os eletrodos de potencial (MN) tiveram um espaçamento cerca de 2m. As medidas de distância foram tomadas na trena, acompanhando a inclinação da rampa. A experiência indica que o arranjo gradiente com esta razão de $AB/MN=17$ fornece um sinal ΔV (diferença de potencial medida entre os eletrodos de potencial) alto. À medida que aumenta esta razão, cai o sinal. Os eletrodos de potencial (potes cerâmicos) eram acomodados nos degraus, sobre uma estopa embebida em solução de sulfato de cobre. A profundidade média de investigação para o arranjo gradiente com espaçamento AB (eletrodos de corrente) igual a 34 metros fica entre 4 e 8 metros no terço central do arranjo (foto 4.2.3).

O interesse deste teste inicial era confirmar se o arranjo era factível e se haviam variações laterais de resistividade que pudessem ser correlacionadas com zonas de fratura/percolação.



Foto 4.2.3: Arranjo gradiente realizado na barragem de UHE Gov. José Richa em dezembro/06.

Na figura 4.2.1 vê-se o mapa de resistividade aparente obtido neste ensaio. Observa-se no mapa que a feição dominante é uma variação transversal à linha de fratura. Lembrando que esta é centrada na linha L0 do arranjo gradiente (fotos 4.1.5 e 4.2.2).

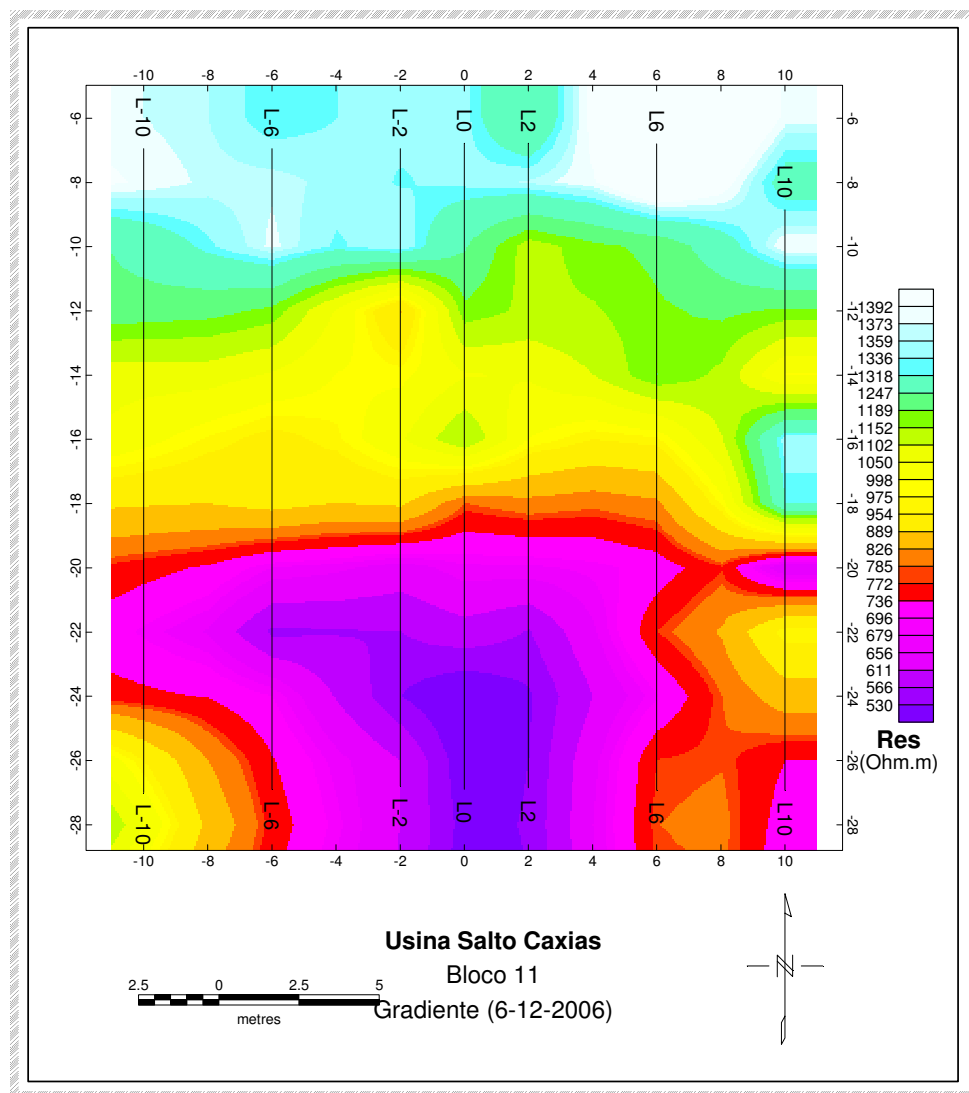


Figura 4.2.1: Mapa de resistividade aparente obtido no primeiro teste com arranjo gradiente. Dezembro/06.

No extremo inferior do mapa, observa-se um alongamento da faixa condutora (atenção para a escala de cores que está invertida, para que as cores quentes vermelho-violeta indiquem alta condutividade, baixa resistividade) na direção e posição esperada para a faixa de fratura pela qual verte água. Mas esperava-se uma manifestação como esta ao longo de toda a faixa e não apenas nesta parte mais baixa.

Creditou-se a falta de resposta característica ao longo da zona de fratura à baixa sensibilidade do arranjo com as linhas paralelas à feição de interesse.

A relativa facilidade de injetar a corrente no corpo de concreto e a expectativa de que a linha de corrente perpendicular à faixa de fratura propiciaria a resposta esperada, sensibilizando melhor a faixa saturada, levou à decisão de executar o arranjo gradiente com vários espaçamentos de linha de corrente, que se estenderiam ao longo de um degrau do talude. Isto foi feito numa segunda campanha, em fevereiro de 2007.

4.3 SEGUNDA CAMPANHA DE CAMPO

Realizada entre os dias 25 de fevereiro e 01 de março de 2007.

O nível do reservatório variou entre as cotas 324,18 e 324,56, representando uma pressão de aproximadamente 60,37 mca (metros de coluna de água). O clima apresentava-se estável, com sol e a temperatura variando de 20 °C a 38 °C durante o dia.

Com base nos resultados obtidos na primeira campanha de campo foram feitas 7 linhas de ensaios ao longo dos degraus da barragem denominadas de L+4, L+2, L0, L-2, L-4, L-6 e L-8, posicionadas em relação à trena da linha central da fissura (linha tracejada na faixa escura, anteriormente assumida como eixo onde coordenada “X=0”) em -3,17m, -6,55m, -10,00m, -14,10m, -16,75m, -20,10m e -23,10 metros respectivamente. Estas distâncias foram determinadas, em função da inclinação da face da barragem para possibilitar uma malha quadrada (2 x 2 metros) na horizontal, necessárias para programas de modelagem 3D.

As linhas de corrente tiveram espaçamentos AB de 30, 40, 50, 60 e 80 metros, constituindo 5 (cinco) níveis de investigação. Na foto 4.3.1 tem-se a disposição das linhas de ensaio para o arranjo gradiente executado nesta etapa.

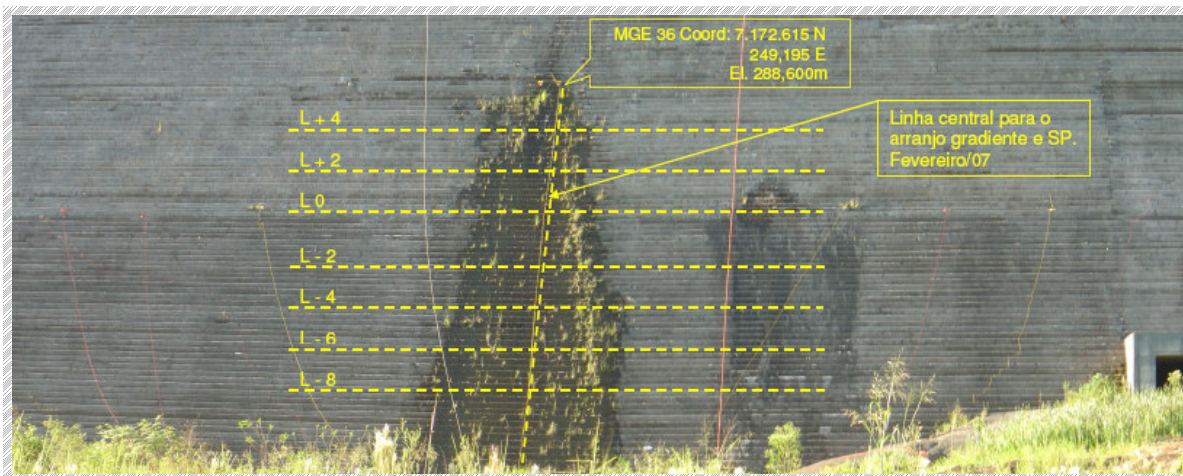


Foto 4.3.1: Disposição das linhas de ensaio para arranjo gradiente. UHE GJR. Fevereiro/07.

Os eletrodos de corrente foram confeccionados com uma grossa camada de folhas de papel alumínio dispostas sobre um “colchão” de dimensões de cerca de 15 cm X 40 cm X 3 cm (largura X comprimento X espessura) composto por argila e lodo saturados com água com sal.

Estes eletrodos eram constantemente umedecidos com água salgada para garantir a passagem da corrente elétrica (foto 4.3.2).



Foto 4.3.2: Eletrodos de corrente confeccionados com papel alumínio sobre argila com água salgada.

Além das linhas de ensaio, outra mudança foi também nos eletrodos de potencial, que tiveram sua superfície de contato triplicada (foto 4.3.3) a fim de fornecer uma melhora na qualidade de recepção dos dados. Entre os potes cerâmicos e concreto foi colocada uma estopa, a qual era freqüentemente embebida em solução de sulfato de cobre.



Foto 4.3.3: *Junção dos eletrodos de potencial para aumentar a superfície de contato concreto-eletrodo.*

Inicialmente os contatos entre os eletrodos e os cabos se davam através de garras tipo “jacaré”. Mais tarde as garras “jacaré” foram substituídas por ligação direta do fio condutor aos parafusos dos potes para melhorar o contato.

O eletrodo de referência para o SP, que também teve sua área de contato triplicada, foi posicionado logo a jusante da barragem numa fina camada de solo (foto 4.3.4).

Os eletrodos de potencial no arranjo gradiente tiveram entre si espaçamento de 2 metros. A disposição de vários ABs no arranjo gradiente garantiu um aumento na profundidade investigada, enquanto que o pequeno

espaçamento entre os eletrodos de potencial propiciou um maior detalhe da variação lateral do potencial e da resistividade.

Nesta etapa foram realizadas mais de 450 medidas. As leituras foram paciente e exaustivamente checadas a fim de reduzir ao mínimo a incorrência de erro durante o tratamento dos dados obtidos.



Foto 4.3.4: Eletrodo de referência instalados a jusante da barragem.

Entre a segunda e terceira etapa de campo foi efetuado um levantamento de campo intermediário, no qual (com a colaboração da equipe do departamento de geomática da UFPR), determinou-se, através de estação total, coordenadas dos principais pontos medidos, para georreferenciamento.

Na tabela 4.3.1 mostra-se as coordenadas dos principais pontos para “amarração” das linhas de ensaio.

Na figura 4.3.1 os pontos georreferenciados das principais estações de medidas e eletrodos estão posicionados na barragem.

Tabela 4.3.1: Coordenadas geográficas das principais estações de medida usadas para ensaio de resistividade e potencial espontâneo.

Ponto	Linha	Estação	Coordenadas UTM		Cota Linha (m)
			N	E	
1	L +4	+12	7.172.630,3	249.845,6	286,900
2	L +2	+12	7.172.628,3	249.846,2	284,200
3	L 0	+12	7.172.626,3	249.846,4	281,500
4	L 0	B30	7.172.627,0	249.849,6	281,500
5	L 0	B40	7.172.628,1	249.854,5	281,500
6	L 0	B50	7.172.629,2	249.859,4	281,500
7	L 0	B60	7.172.630,4	249.864,3	281,500
8	L 0	B80	7.172.632,5	249.874,0	281,500
9	L -2	+12	7.172.623,9	249.847,1	278,800
10	L -4	+12	7.172.622,4	249.847,5	276,100
11	L -6	+12	7.172.620,5	249.848,1	273,400
12	L -8	+12	7.172.618,8	249.848,7	270,700
13	L +4	-12	7.172.625,0	249.822,3	286,900
14	L +2	-12	7.172.623,1	249.822,8	284,200
15	L 0	-12	7.172.621,1	249.823,3	281,500
16	L 0	A30	7.172.620,5	249.820,3	281,500
17	L 0	A40	7.172.619,4	249.815,5	281,500
18	L 0	A50	7.172.618,3	249.810,6	281,500
19	L 0	A60	7.172.617,2	249.805,8	281,500
20	L 0	A80	7.172.615,0	249.796,0	281,500
21	L -2	-12	7.172.618,7	249.823,7	278,800
22	L -4	-12	7.172.617,2	249.824,0	276,100
23	L -6	-12	7.172.615,3	249.824,7	273,400
24	L -8	-12	7.172.613,5	249.825,2	270,700
25	Eletr. referência		7.172.608,1	249.890,5	ND

Nota: *Datum* de referência: SAD 69.

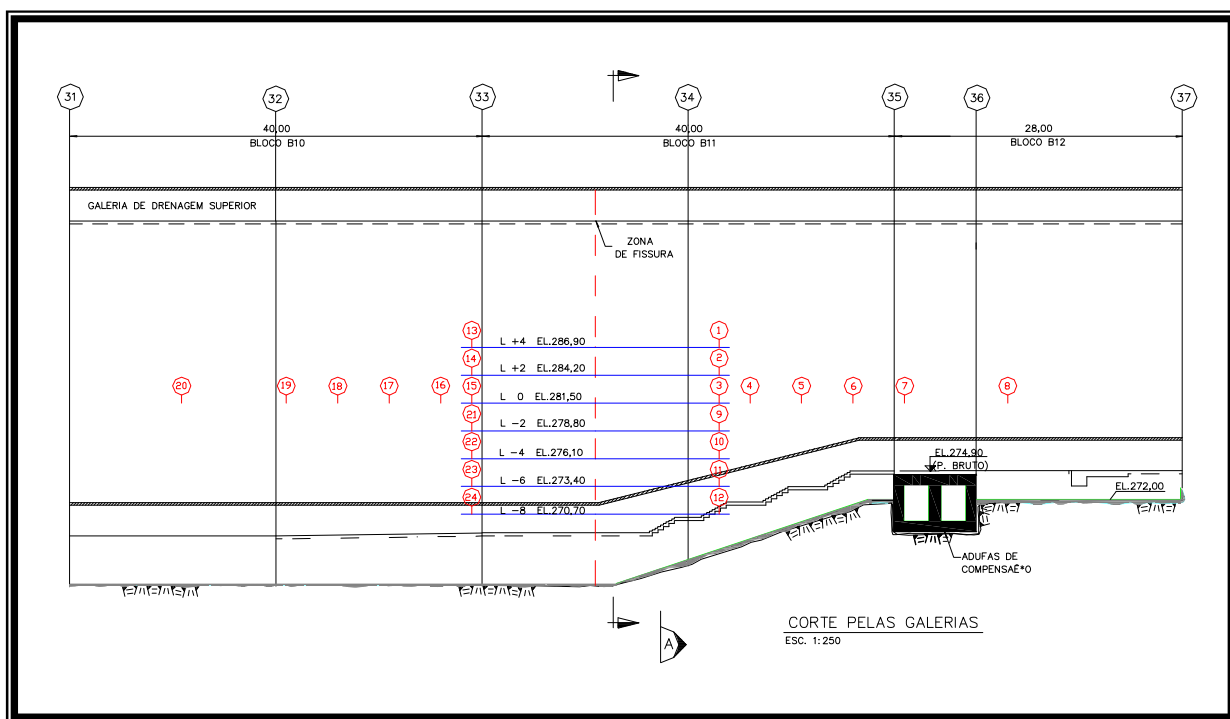


Figura 4.3.1: Corte esquemático da barragem com o posicionamento das principais estações de medida realizadas em fevereiro/2007.

4.4 TERCEIRA CAMPANHA DE CAMPO

Esta campanha foi realizada entre os dias 16 e 20 de julho de 2007. Neste período o nível do reservatório variou entre as cotas 324,23 e 324,65, representando uma pressão de aproximadamente 60,44 mca. O clima apresentava-se instável, com chuva no primeiro dia e sol entre nuvens nos demais. A temperatura variou de 10 °C a 23 °C durante o período diurno.

Nesta etapa procurou-se repetir o levantamento realizado em fevereiro de 2007, a fim de verificar/confirmar se a influência da variação de temperatura, a qual provoca um incremento na infiltração de água pela barragem é perceptível nos mapas de resistividade aparente e equipotenciais.

Os levantamentos de SP e arranjo gradiente foram expandidos (foto 4.4.1, figuras 4.4.1 e 4.4.2), com linhas acima da região de surgência de água na

barragem, procurando desta forma, atingir áreas mais secas e sair da zona de influência da fissura.

Foram desenvolvidas 9 (nove) linhas de ensaio nos degraus, denominadas de L+8, L+6, L+4, L+2, L0, L-2, L-4, L-6 e L-8, posicionadas em relação à trena da linha central da fissura (linha tracejada na faixa escura, anteriormente assumida como “X = 0”) em +3,35m, 0,00m, -3,17m, -6,55m, -10,00m, -13,40m, -16,75m, -20,10m e -23,10 metros respectivamente.

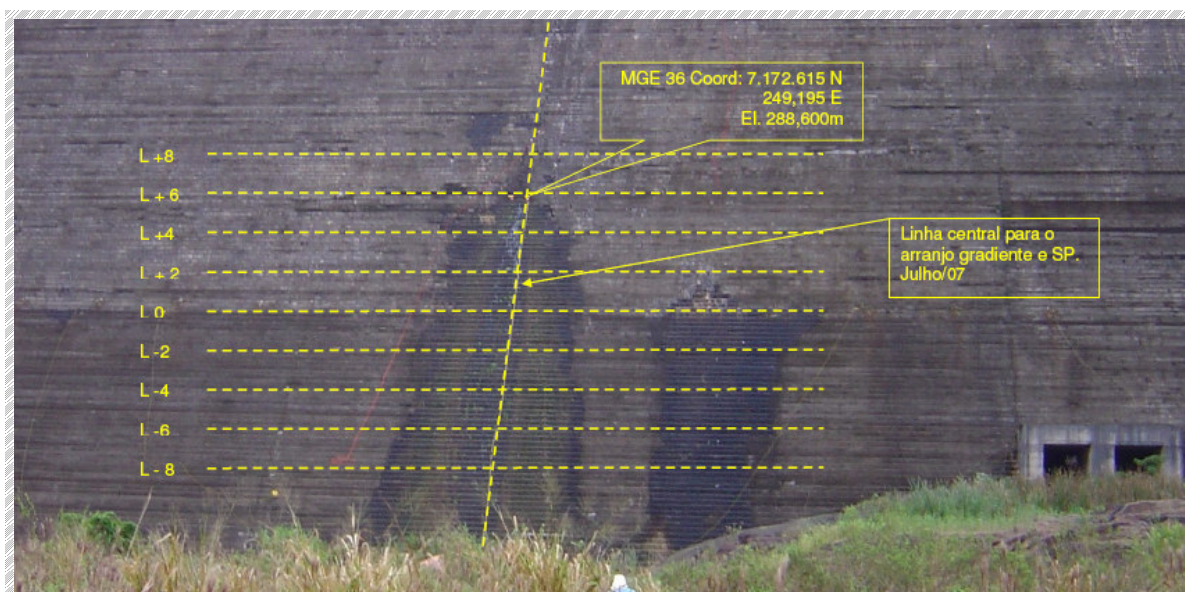


Foto 4.4.1: Disposição das linhas de ensaio para o arranjo gradiente. UHE GJR. Julho/07.

As posições dos eletrodos de corrente e de referência e o posicionamento das linhas mantiveram-se os mesmos utilizados na etapa anterior. Apenas a linha L-2 foi ligeiramente deslocada para cima para regularizar a malha de ensaio.

A expansão lateral foi pequena. Optou-se por não se utilizar o AB de 30 metros para possibilitar que os eletrodos de potencial (MN) chegassem até as estações de -16 e +16 metros. Desta maneira foram realizadas linhas com ABs de 40, 50, 60 e 80 metros, embora o AB de 30 metros pudesse ter sido utilizado com um número a menos de medida.

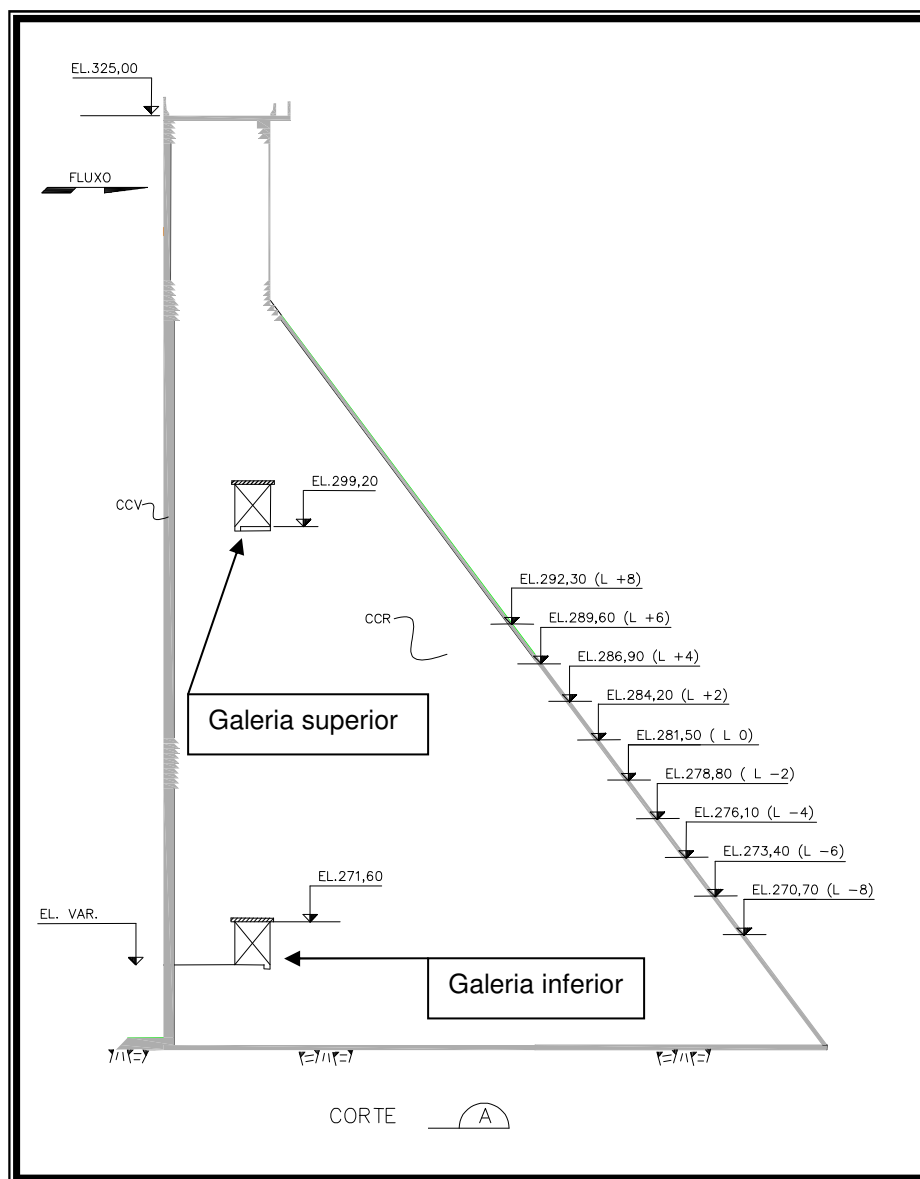


Figura 4.4.1: Corte transversal esquemático com o posicionamento das linhas de ensaio.

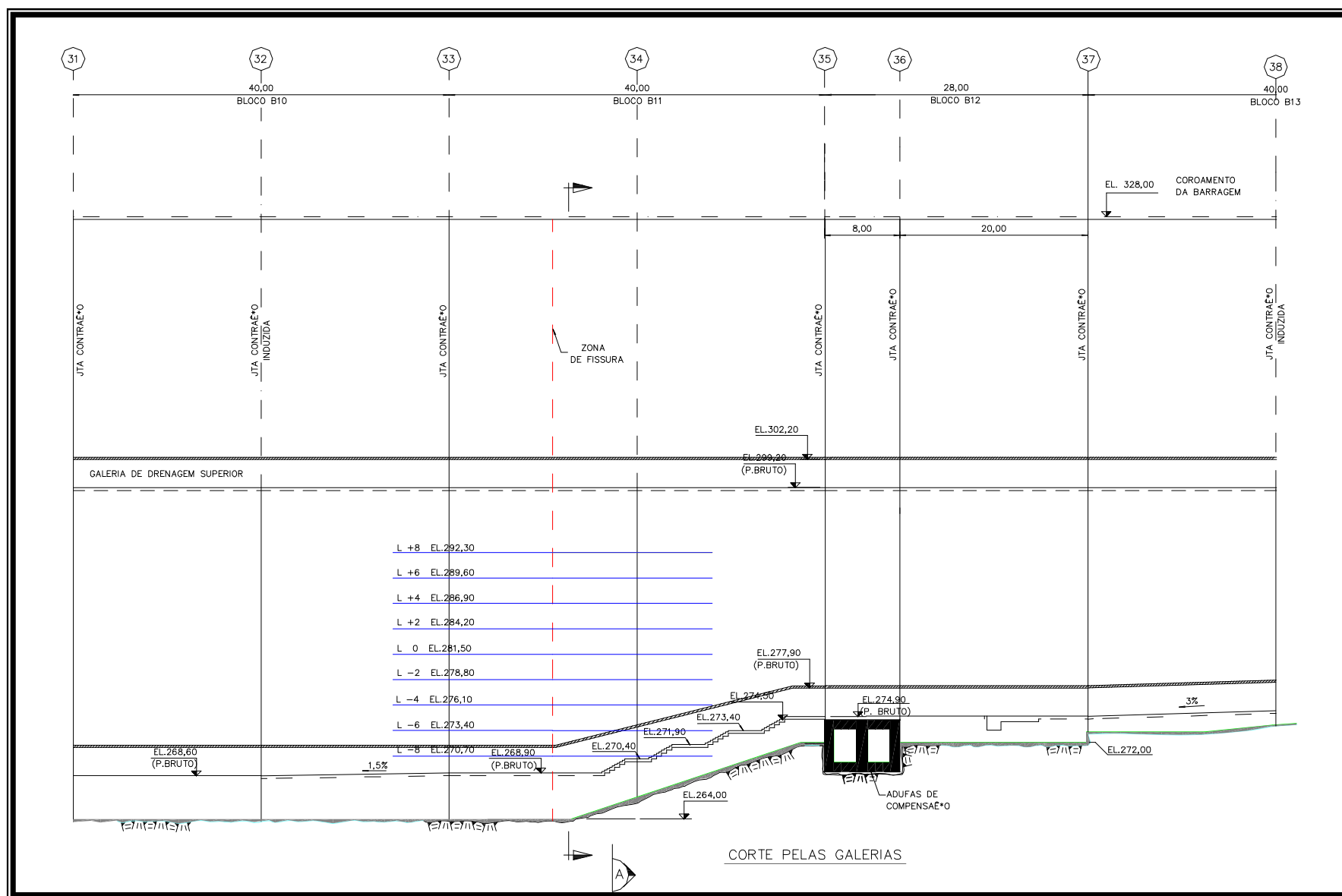


Figura 4.4.2: Corte longitudinal esquemático com o posicionamento das linhas de ensaio.

4.5 QUARTA CAMPANHA DE CAMPO

Esta campanha foi realizada entre os dias 17 e 21 de setembro de 2007. Neste período o nível do reservatório variou entre as cotas 324,15 e 324,33, representando uma pressão de aproximadamente 60,25 mca. O clima apresentava-se estável com sol, chovendo somente no final da tarde do último dia de trabalho de campo. A temperatura variou de 18 °C a 35 °C durante o período diurno.

Devido à boa resposta anteriormente fornecida pelo SP, nesta campanha decidiu-se fazer uma nova verificação das medidas de potencial espontâneo (SP), porém com linhas mais extensas, atingindo as regiões mais “secas”, esperando-se desta forma, sair da área de influência da fissura e determinar melhor a resposta do corpo da barragem onde não se tem fissuramento visível.

As determinações de SP foram realizadas nas linhas ensaiadas nas etapas anteriores. Sete das nove linhas de ensaio (L+8, L+6, L+4, L+2, L0, L-2, L-4), tiveram a extensão de 130 metros, sendo 65 metros para cada lado, posicionados em relação à trena da linha central da fissura (linha tracejada foto 4.5.1).

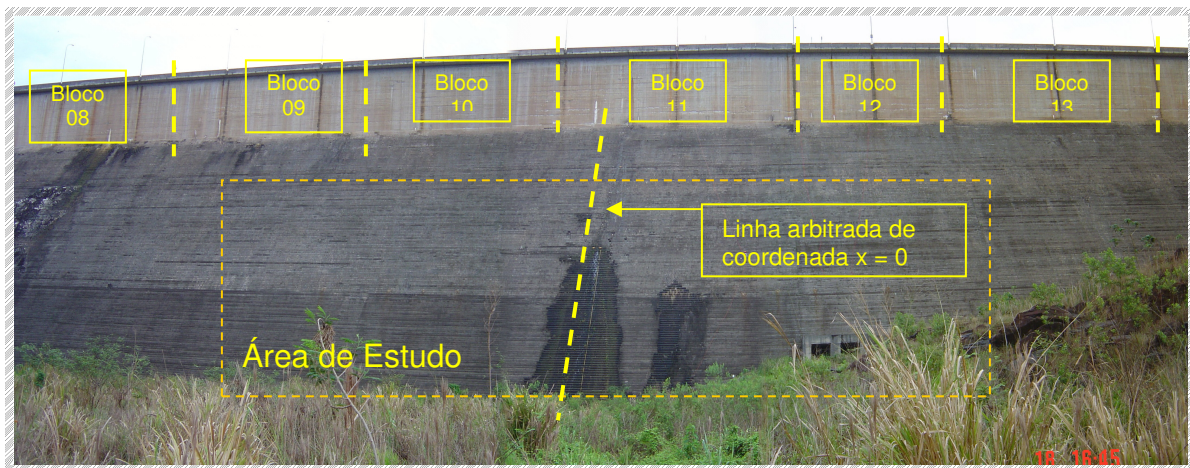


Foto 4.5.1: Fotomosaico da área de estudo de 4ª. Campanha de campo, realizada em setembro/2007. UHE Salto Caxias.

A linha L-6 teve a extensão total de 92 metros sendo 65 metros à esquerda da linha de fissura e 27 metros à direita (vista de frente), fazendo limite com a parede da “adufinha”. A linha L-8 teve a extensão total de 61 metros sendo 40 metros à esquerda da linha de fissura e 21 metros à direita (vista de frente), onde o concreto dos degraus faz contato com a rocha do embasamento (foto 4.5.2)

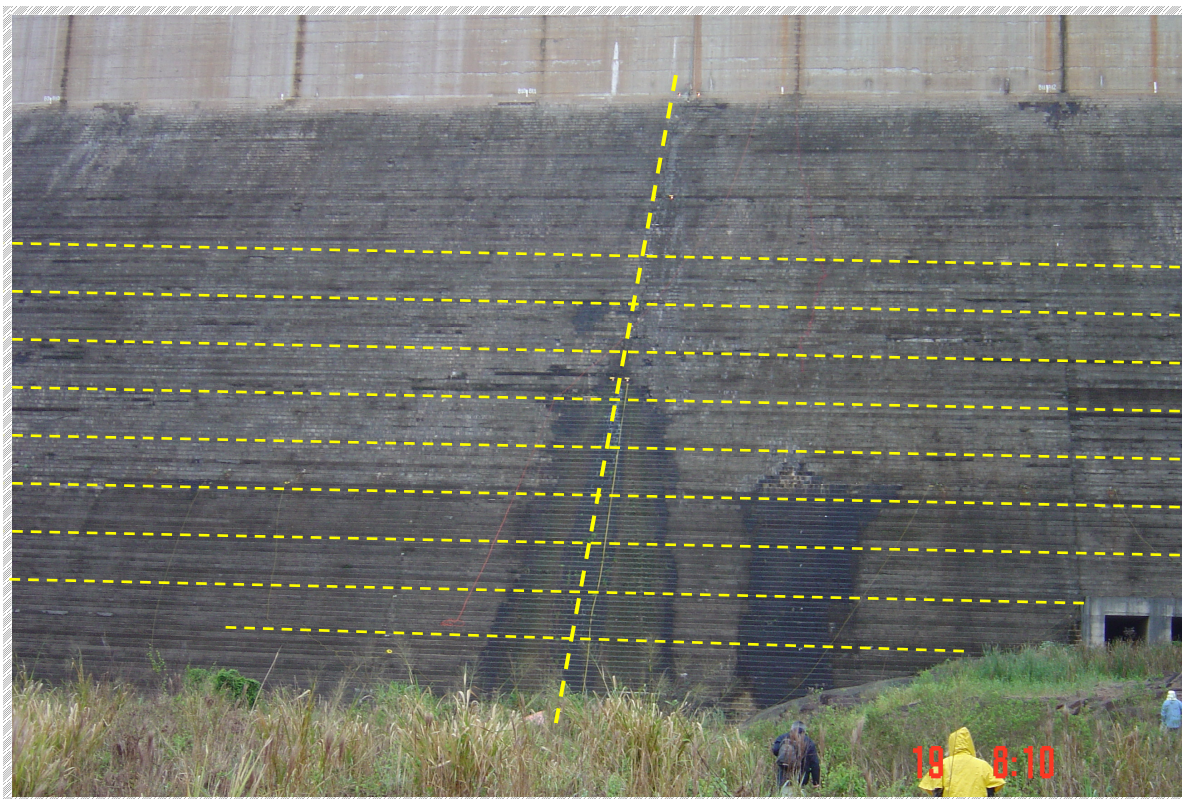


Foto 4.5.2: Vista jusante das fissuras do bloco B11. As linhas tracejadas horizontais representam as projeções das linhas de ensaio de SP nesta etapa. No canto inferior direito pode-se observar a “adufinha” e o contato entre o concreto da barragem e o maciço rochoso.

Como nas etapas anteriores, para o ensaio de “SP” foi adotada a técnica de base fixa. Para isso, o eletrodo “fixo” foi posicionado na mesma localização anteriormente usada. Nas linhas, foram realizadas determinações de diferença de potencial a cada metro, num total de 1063 medidas. Como em todas as etapas de anteriores, os pontos foram exaustivamente checados aguardando-se a estabilização de valores para o registro das leituras de potencial.

5 PROCESSAMENTO DOS DADOS E COMENTÁRIOS

Este capítulo trata dos procedimentos efetuados para tratar os dados geofísicos obtidos em campo, com intuito de identificar/realçar as feições de interesse.

As pseudo-seções do caminhamento elétrico com o arranjo gradiente e os levantamentos de SP foram tratados com os softwares EarthImager 2D[®], versão 2.1.7 (AGIUSA) e Geosoft[®] (Geosoft Incorporated, 1994), disponíveis no mercado.

Novamente ressalta-se que os métodos geofísicos têm certo grau de ambigüidade em sua interpretação. A modelagem numérica dos dados não tem solução única e as diversas técnicas de interpolação podem gerar efeitos enganosos nos limites das malhas.

Enquanto muitos estudos com SP e resistividade em barragens de terra são encontrados na literatura (Ellert & Sanches, 1982, Gallas, 2000, Iyomasa *et al*, 2005) nenhum caso foi encontrado para barragens onde métodos geofísicos são aplicados diretamente no concreto. Entende-se por isto, que o presente estudo tem caráter original neste sentido. Com o sucesso na determinação da distribuição da resistividade no corpo da barragem revelando as zonas condutoras (zonas fraturas com percolação de água/fluidos), o presente estudo já demonstrou ter alcançado um excelente resultado.

Por se tratar de uma fase experimental, onde a disposição das linhas de ensaio não se mostrou eficaz, os resultados obtidos nos ensaios da primeira etapa de campo não serão considerados neste capítulo.

5.1 ENSAIOS DE RESISTIVIDADE COM ARRANJO GRADIENTE

Este ensaio foi realizado com resistivímetro marca Tectrol, modelo TDC1000/24R2A, além baterias externas (para fonte de energia), multímetro digital de marca HC Products Co. Ltd., modelo Protek 506 e cabos múltiplos. Nos eletrodos de referência e potencial foram usados potes cerâmicos com solução de

sulfato de cobre (não polarizáveis), enquanto que os eletrodos de corrente foram “confeccionados” com papel alumínio imerso em poças de água salgada.

Os dados obtidos durante os levantamentos de campo foram processados para determinação da resistividade aparente (ver capítulo 3) e *plotados* em mapas.

Nesta pesquisa efetuou-se a análise dos resultados apenas sobre os dados de resistividade aparente, de forma qualitativa. Vale lembrar que a resistividade tem um objetivo amplo no estudo, buscando diagnosticar a aplicabilidade de métodos elétricos e eletromagnéticos em geral, além do objetivo específico de apoiar o levantamento de SP na determinação dos caminhos preferenciais de fluxo. A repetição do levantamento de resistividade em diferentes estações do ano, com vários meses de intervalo, procurou-se também avaliar possíveis mudanças na resposta, que possam ser associadas seja à variação no grau de saturação ou na extensão da zona de fissuramento.

Uma análise quantitativa através de processos de inversão 3D para obtenção de modelos 3D, possibilitariam uma interpretação mais conclusiva nos vários aspectos explorados, porém estas análises deverão ser efetuadas em pesquisas posteriores.

Na seqüência, faz-se uma abordagem inicialmente por época (fevereiro e julho de 2007) e posteriormente analisando comparativamente os resultados.

- LEVANTAMENTO DE FEVEREIRO 2007

A figura 5.1.1 mostra os mapas de distribuição da resistividade aparente para os vários ABs utilizados no arranjo gradiente em fevereiro. Nestes mapas a escala de cores é individual, para salientar as feições anômalas, permitindo que cada mapa ressalte o melhor possível o comportamento da resistividade aparente. Os mapas representam planos paralelos à superfície inclinada do talude. À medida que aumenta o AB, aumenta a profundidade de investigação, de forma que os mapas são “depth-slices” (cortes em diferentes profundidades), apenas que, sem a modelagem numérica não se conhece a distribuição real e nem a profundidade a que as medidas se referem. Na verdade, uma estimativa poderia

ser deduzida a partir das pseudo-profundidades de Edwards (Edwards, 1977), mas é ainda um tanto confuso como lidar com a gradação do arranjo gradiente para o pólo-dipolo à medida que diminui a distância entre o ponto de medida MN e um dos eletrodos de corrente.

A área envolvida nos mapas da figura 5.1.1 é maior do que a área mapeada, para facilitar a comparação com os mapas do levantamento de julho de 2007, no qual a área levantada foi maior.

A feição dominante nestes mapas, particularmente nos ABs maiores (profundidades maiores) é o baixo de resistividade observado no canto inferior direito. Ocorre ali um alto de rocha (basaltos muito fraturados) que deve ser responsável por esta feição. Mesmo assim é possível identificar um eixo condutor na parte central da área, melhor definido no AB=50m.

Para facilitar a comparação entre as respostas dos vários ABs, a figura 5.1.2 mostra os mesmos mapas da figura 5.1.1, quando se utiliza uma mesma escala de cores para todos os ABs. No caso foi utilizada a escala do mapa do AB=50m. Nota-se um gradativo decréscimo da resistividade com o aumento do AB.

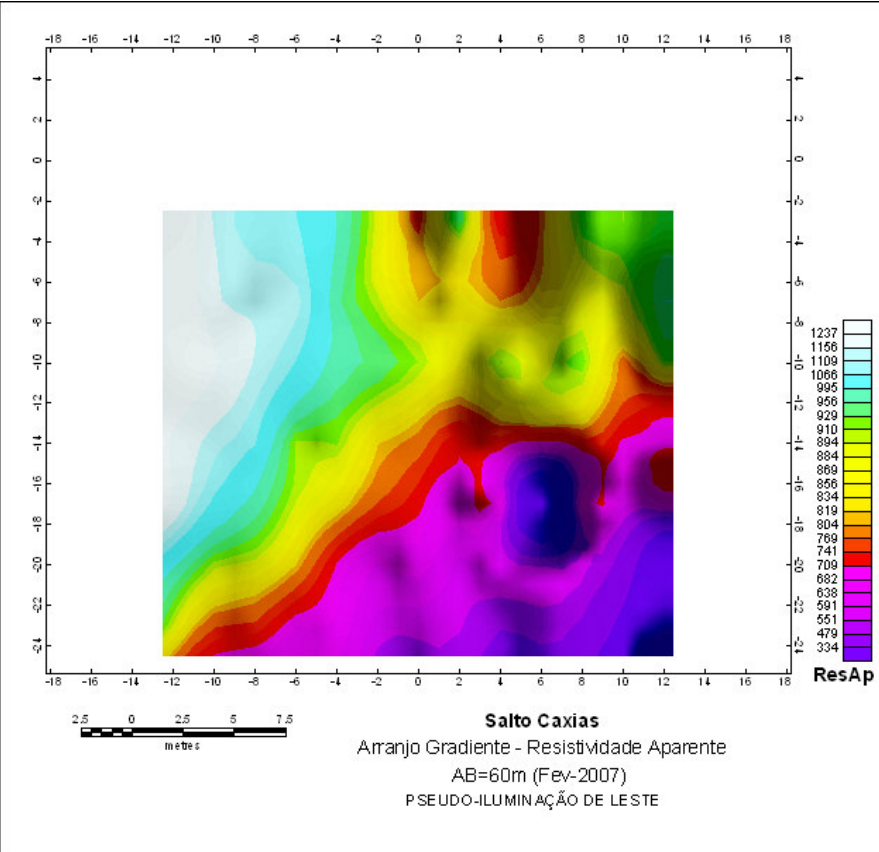
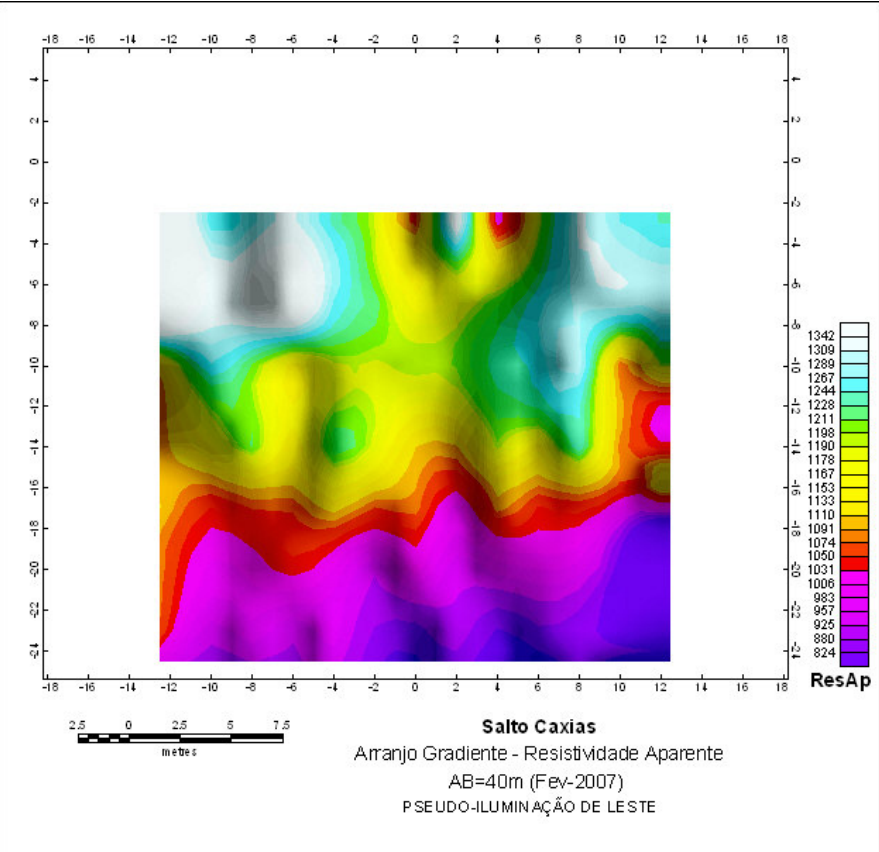
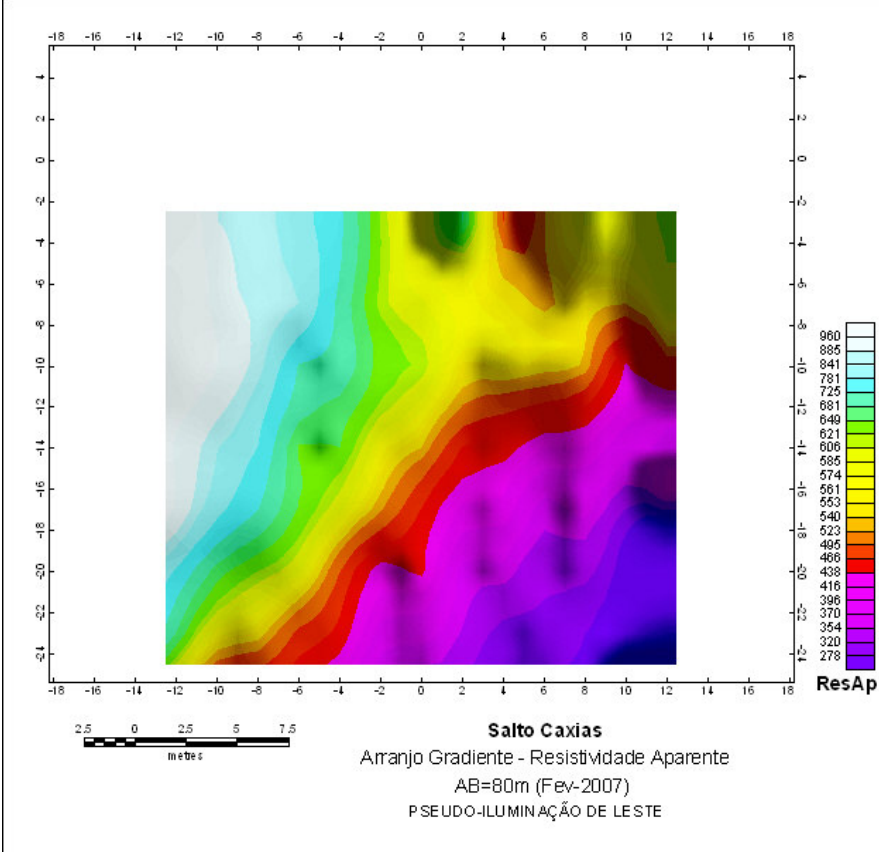
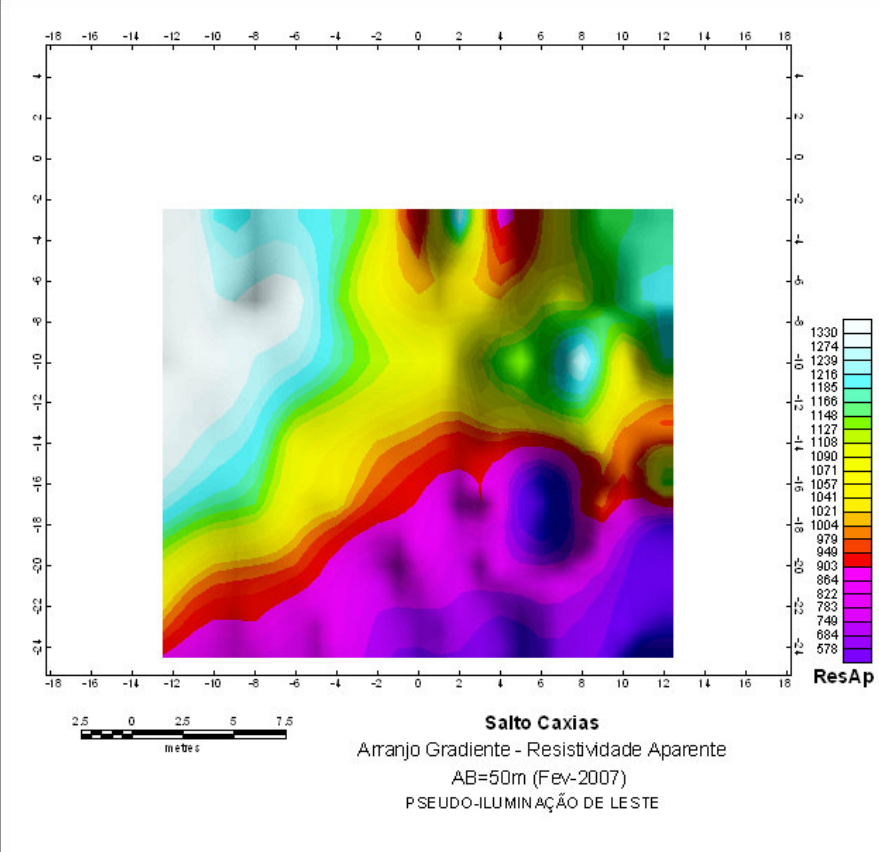
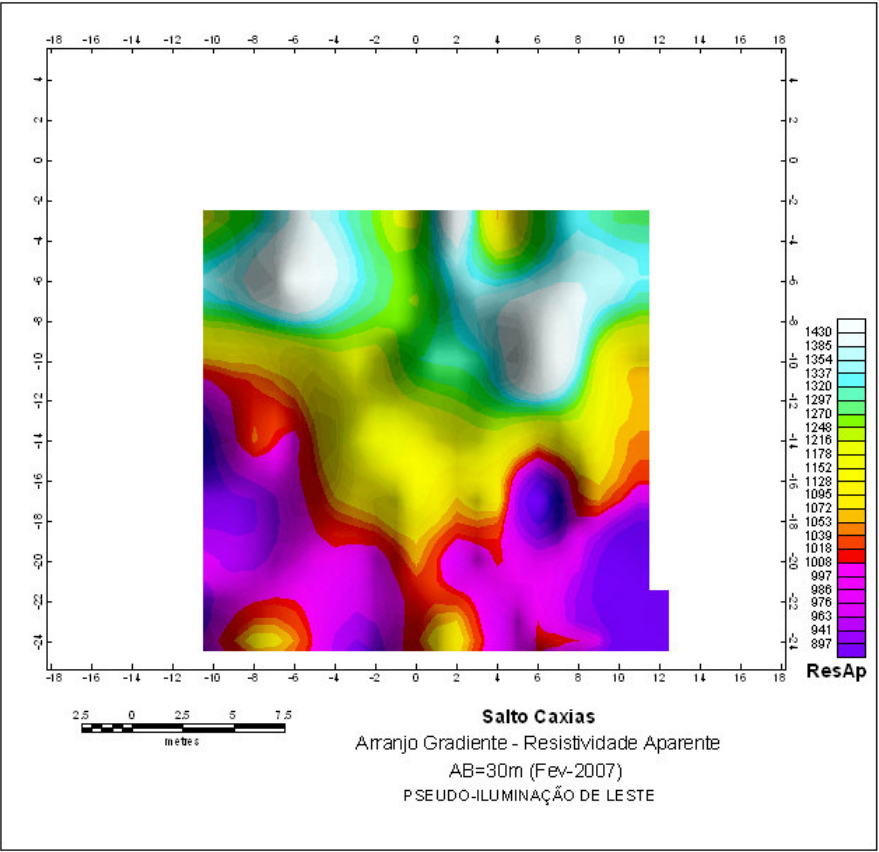


Figura 5.1.1: Resistividade aparente do arranjo gradiente em fev-2007. De cima para baixo, no lado esquerdo, ABs de 30 e 40m, no centro ABs de 50 e 60m e no lado direito, AB de 80m. A escala de cor é individual, diferente para cada mapa.

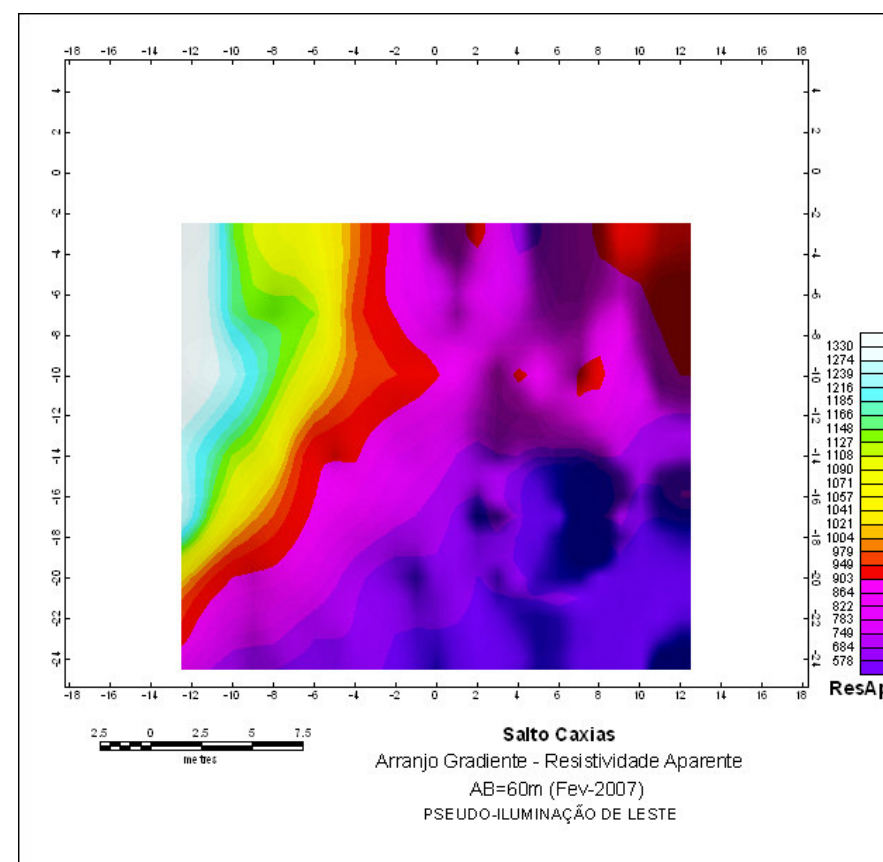
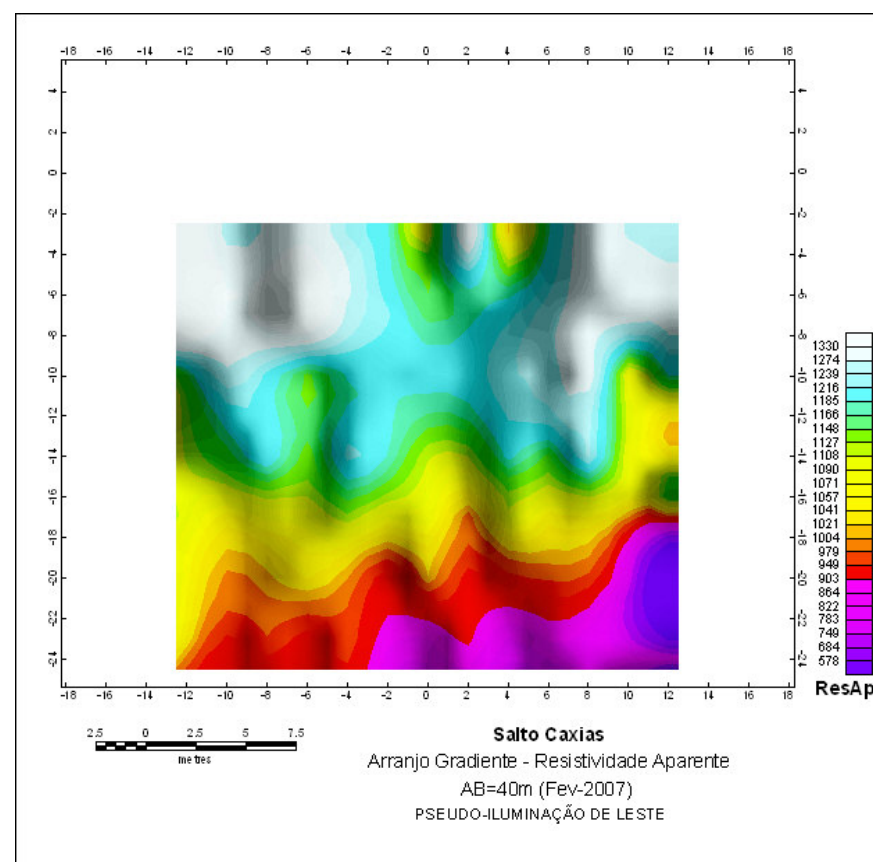
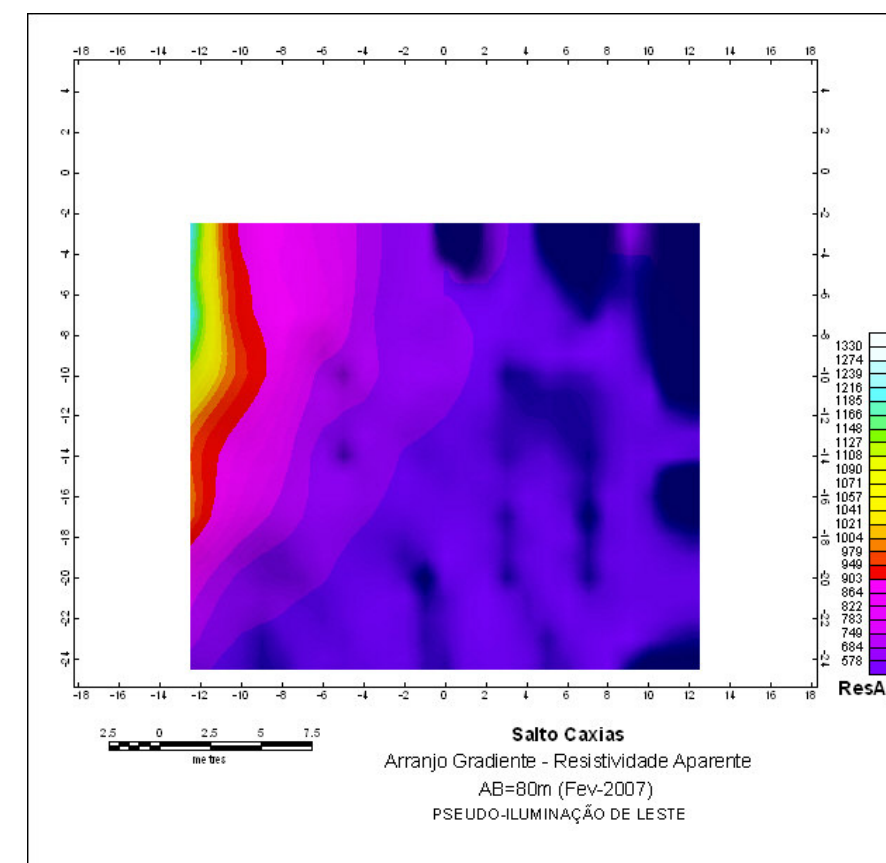
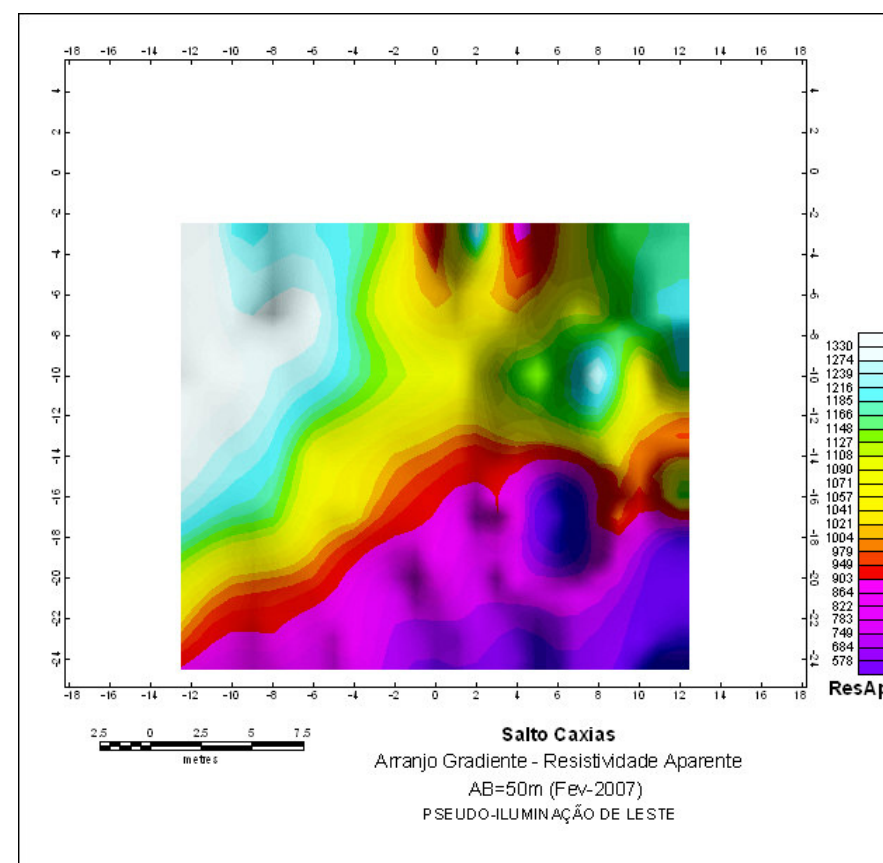
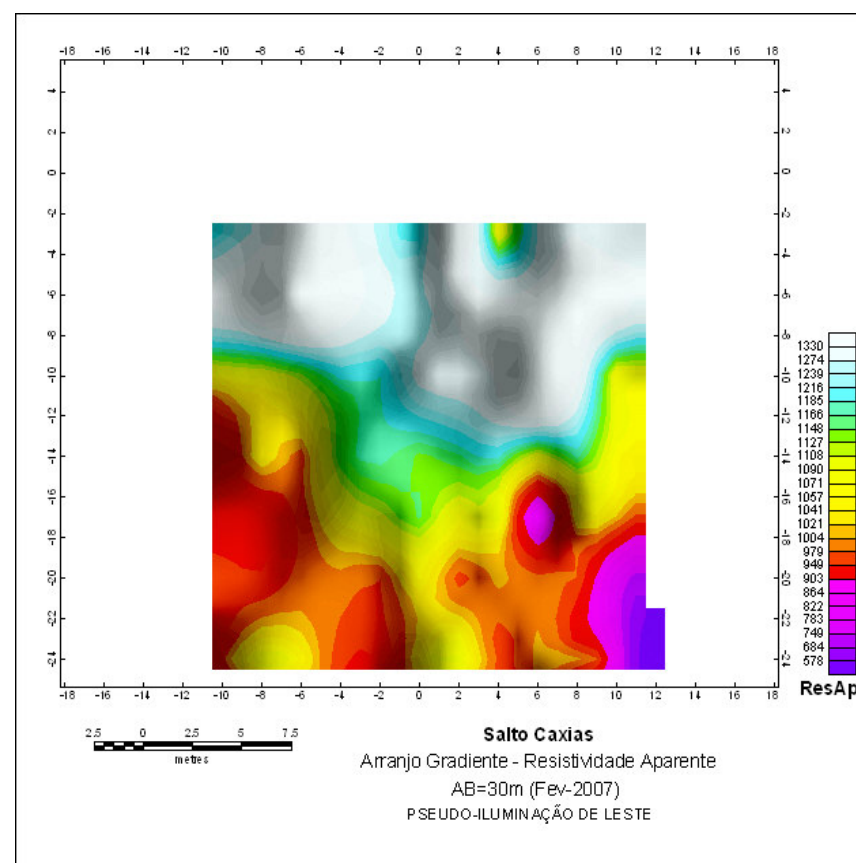


Figura 5.1.2: Resistividade aparente do arranjo gradiente em fev-2007 como na figura 5.1.1, quando a escala de cores é uma só para todos os 5 ABs.

O decréscimo da resistividade com o aumento de AB ou com o aumento da profundidade investigada, reflete em parte o aumento do grau de saturação desde a superfície do corpo de concreto da barragem até a base da mesma. Já nas profundidades maiores (AB de 60 e 80m) domina a resposta da rocha subjacente. Espera-se de fato uma resistividade (mesmo aparente) de apenas algumas centenas de Ohm.m para basaltos muito fraturados como se observa nos afloramentos logo abaixo do corpo da barragem.

Interrompe-se aqui a discussão dos dados do levantamento de fevereiro, para retornar adiante na comparação com os de julho. Os possíveis eixos condutores serão melhor analisados sobre os dados de julho, quando derivadas direcionais são calculadas para salientá-los.

- LEVANTAMENTO DE JULHO 2007

No levantamento de julho, optou-se por evitar o AB de 30m, uma vez que ele parece refletir apenas a parte muito superficial, mais resistente do corpo de concreto e porque também permite um retângulo de medidas muito pequeno. Nas figuras 5.1.3 e 5.1.4 equivalentes às anteriores para o levantamento de fevereiro, deve-se observar que o quadro xy é o mesmo das figuras 5.1.1 e 5.1.2, com a diferença que é agora preenchido por dados, em função da expansão da malha de medidas. Se no levantamento de fevereiro as medidas aproximavam-se dos eletrodos do AB=30m, em julho elas se aproximam do AB=40m. Procurou-se ocupar os mesmos locais de eletrodos nos dois levantamentos, de forma que, dentro do quadro menor ocupado pelo levantamento de fevereiro, as medidas foram repetidas em julho.

Com a área de levantamento expandida, o eixo condutor central é bem mais evidente nas figuras 5.1.3 e 5.1.4. Não se tem razão aqui para dizer que esta diferença seja consequência de variáveis sazonais. Ela pode resultar simplesmente do fato de o levantamento de julho cobrir uma área maior, amostrando uma quantidade maior da resposta padrão do corpo de concreto, que acaba definindo melhor a anomalia central de baixa resistividade. É difícil ainda dizer se as resistividades maiores em ambos os lados do retângulo, mais evidentes nos ABs de 40 e 50m, são ao menos em parte influenciadas pela maior proximidade dos eletrodos de corrente.

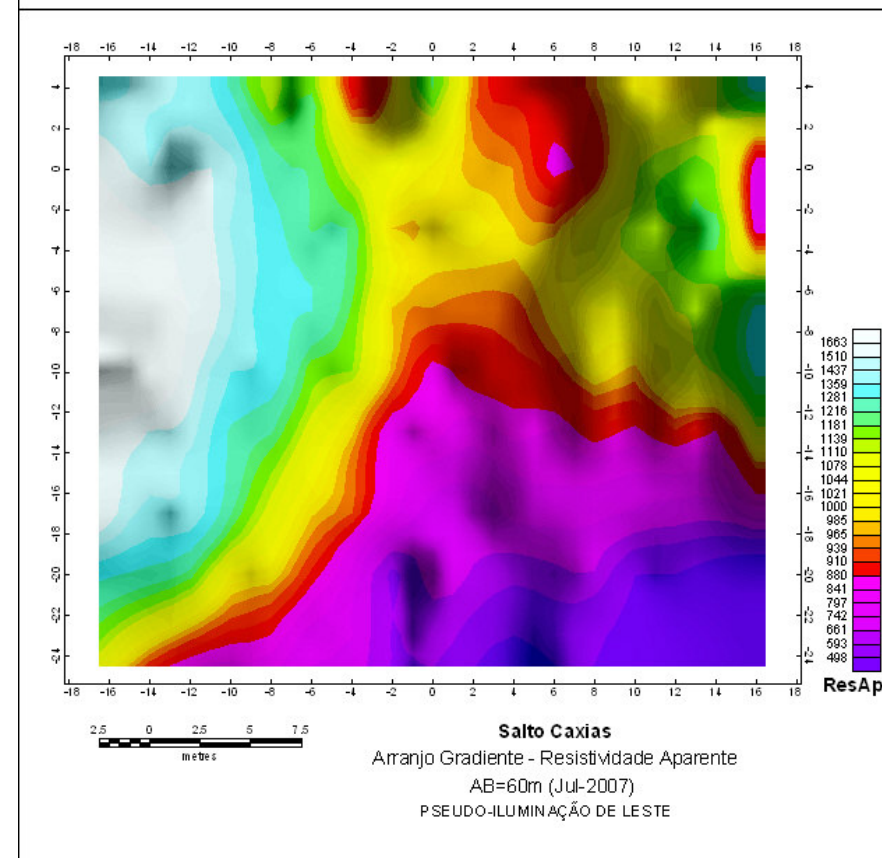
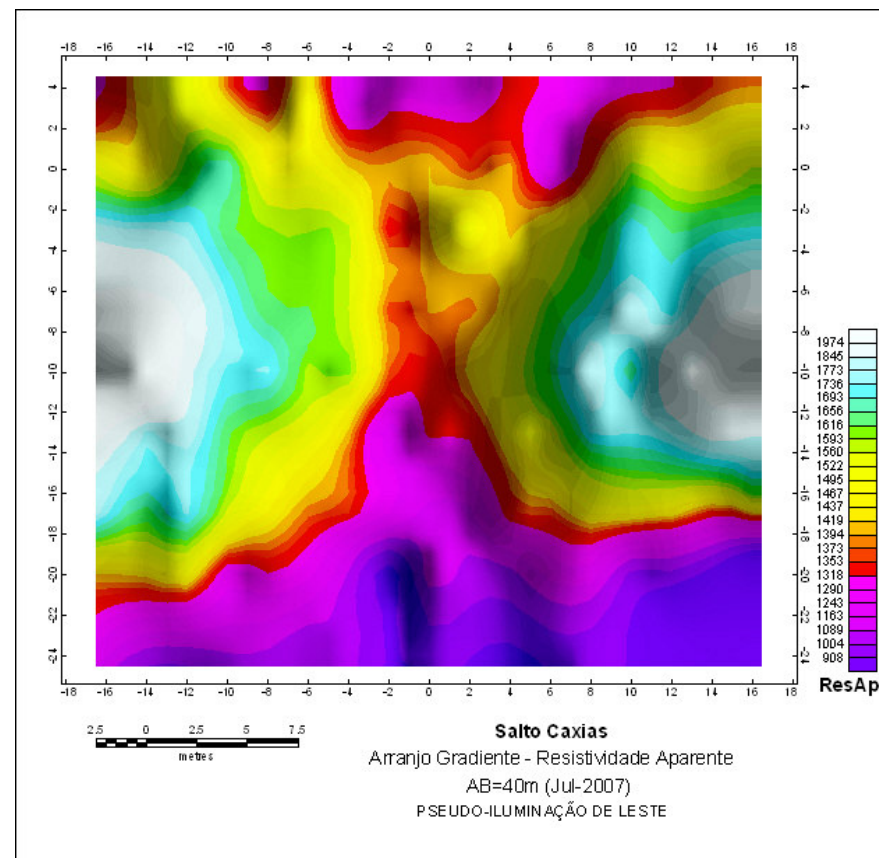
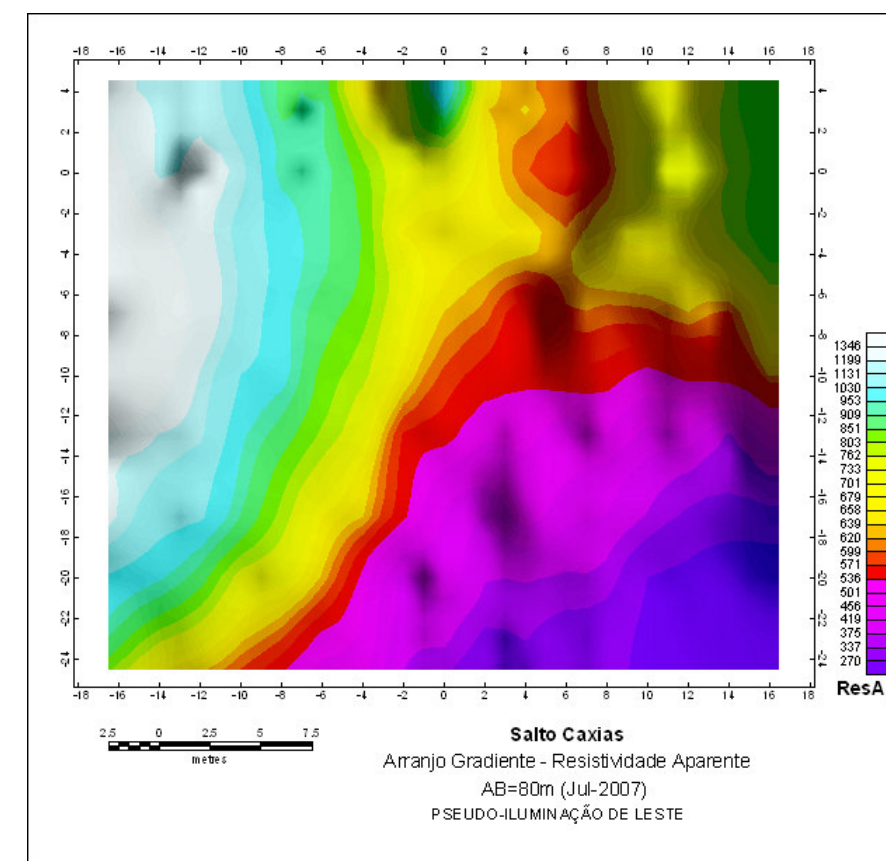
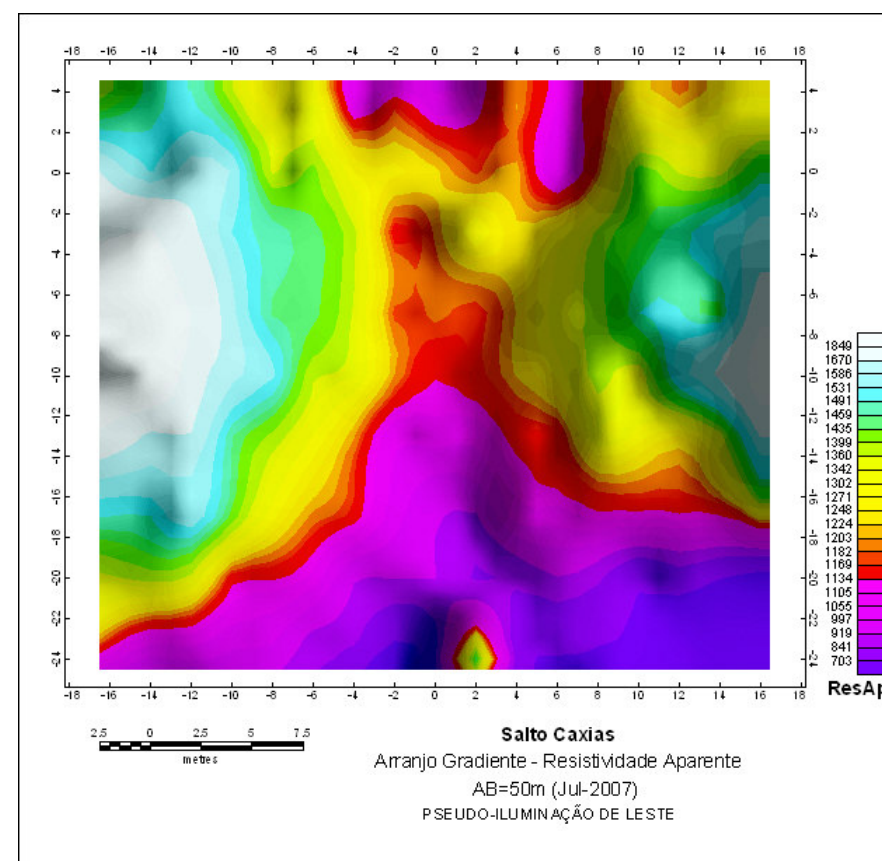


Figura 5.1.3: Resistividade aparente do arranjo gradiente em julho-2007. No lado esquerdo, AB de 40, no centro de cima para baixo ABs de 50 e 60m; no lado direito, AB de 80m. A escala de cor é individual, diferente para cada mapa.

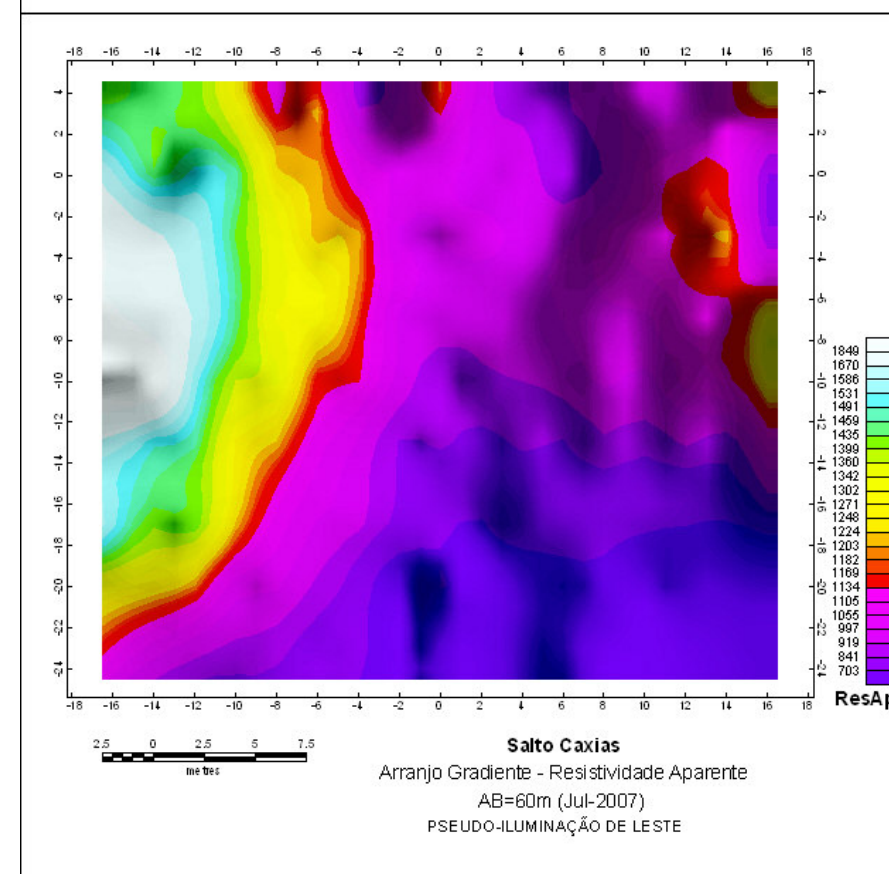
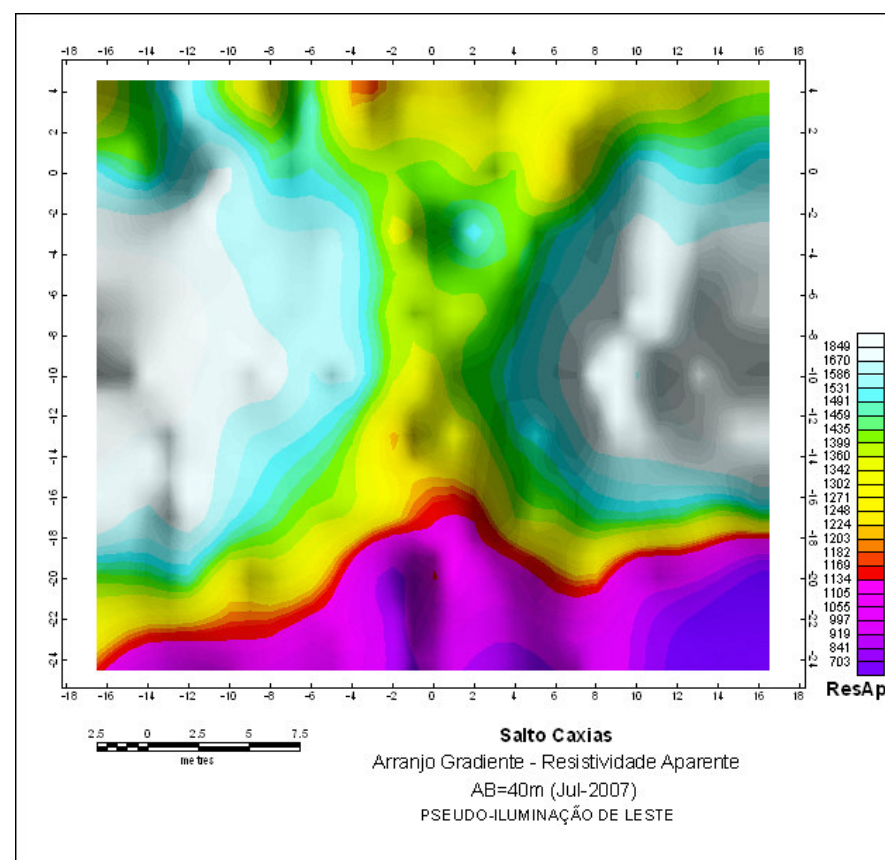
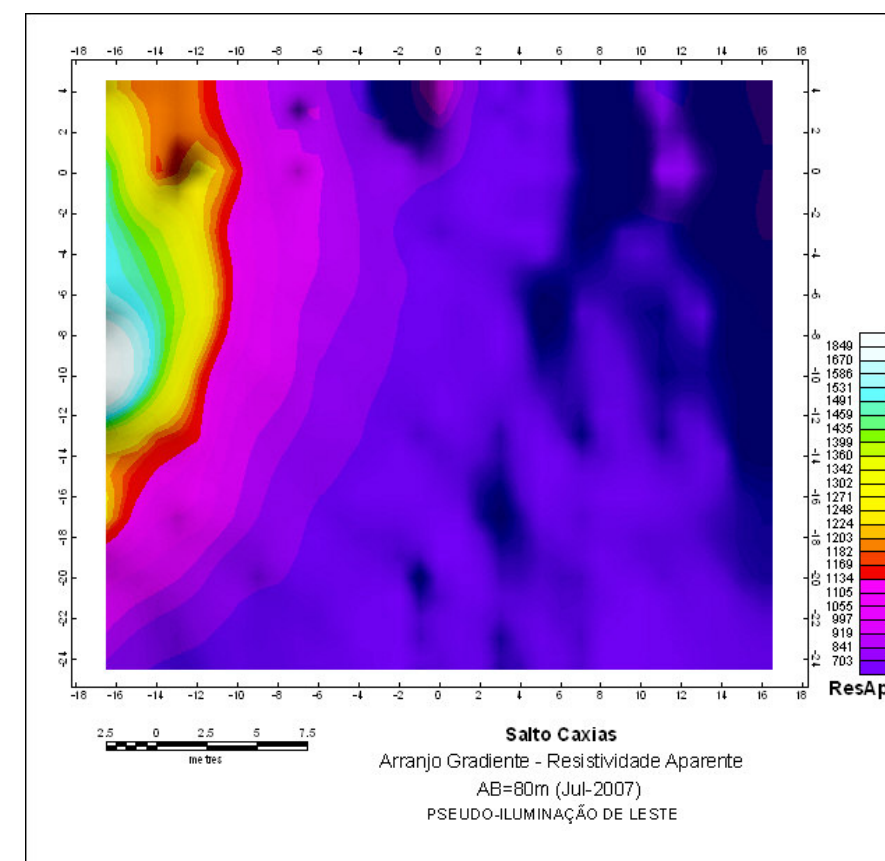
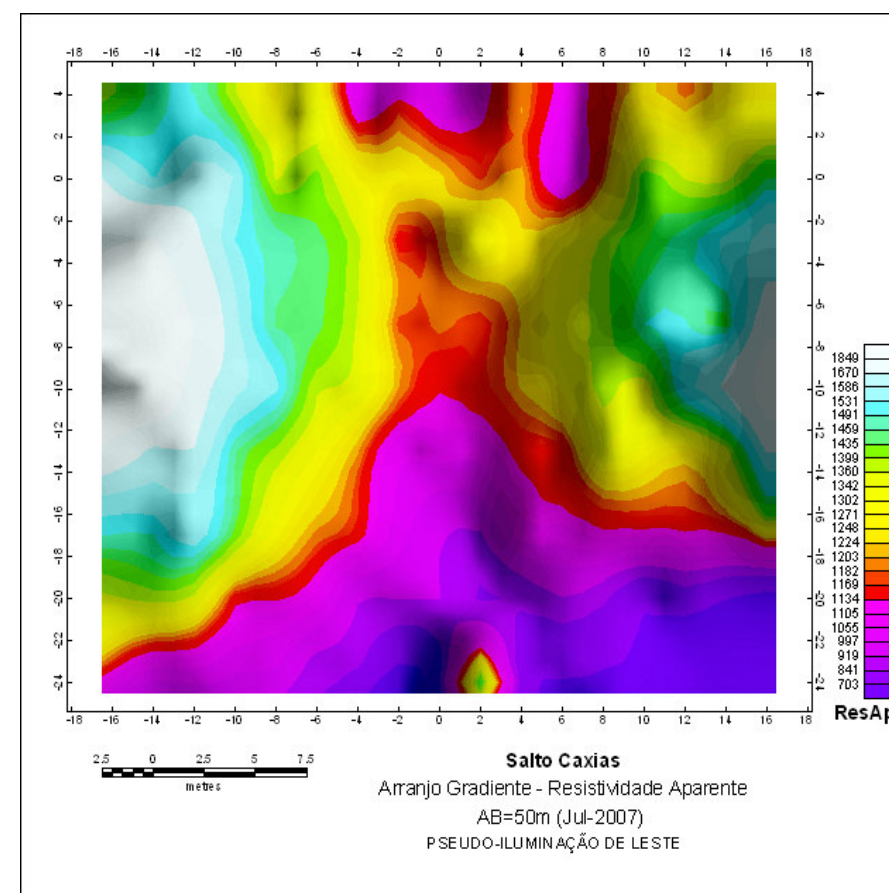


Figura 5.1.4: Resistividade aparente do arranjo gradiente em julho-2007 como na figura 5.1.3, quando a escala de cores é uma só para todos os ABs.

De forma semelhante ao comportamento observado no levantamento de fevereiro, nota-se na figura 5.1.4 que a resistividade decresce com o aumento da profundidade, com a rocha subjacente respondendo com resistividade menor do que a observada no corpo de concreto, como evidenciado pelos ABs de 60 e 80m. Nos ABs de 40 e 50m continua bem evidente o corredor central de baixa resistividade, correlacionável à faixa de fissuramento.

- ANÁLISE COMPARATIVA FEVEREIRO X JULHO

Embora os mapas de resistividade aparente de cada um dos levantamentos tenham sido plotados em figuras anteriores, utilizando cada um a sua vez uma determinada escala de cores, para efeito de comparação do que ocorre à medida que aumenta a profundidade investigada com o aumento de AB, não foi apresentada ainda uma comparação fácil de analisar entre os dois levantamentos. Entretanto pode-se verificar a consistência do levantamento de resistividade com o arranjo gradiente no corpo de concreto da barragem e também identificar uma resposta característica da faixa de fissuramento do Bloco 11.

Faz-se agora a comparação entre os dois levantamentos para os ABs de 40 a 80m. As figuras 5.1.5 a 5.1.8 mostram lado a lado a plotagem dos mapas da resistividade aparente de cada AB. À medida que aumenta o AB, desaparece a diferença que é observada para o AB de 40m. Neste AB a resistividade de fevereiro é mais baixa do que a de julho. Isto pode indicar que uma área maior estava saturada na profundidade investigada por este AB em fevereiro, mas tal afirmação ainda carece de mais evidências. Nos ABs de 60 e 80m a diferença entre os dois levantamentos é mínima. Espera-se mesmo que, em profundidade, o grau de saturação seja máximo em qualquer das estações do ano.

Para finalizar a análise qualitativa dos dados de resistividade aparente, apresenta-se na figura 5.1.9 os mapas da derivada direcional D_x na direção x (ao longo dos degraus) sobre os dados do levantamento de julho. É importante notar que ao longo do texto são utilizadas diferentes escalas de cores. O baixo de resistividade (alta condutividade) aparece no extremo vermelho quando são plotados mapas de resistividade. Já em outras plotagens como do SP e das

derivadas da resistividade aparente, o vermelho é atribuído aos valores mais altos como usual. Observando-se então os mapas da derivada Dx na figura 5.1.9, vê-se evidente o lineamento associado ao eixo condutor central discutido anteriormente. Espera-se que a derivada direcional Dx elimine em parte os efeitos de eletrodos que estejam presentes nos mapas de resistividade discutidos anteriormente, salientando lineamentos paralelos à faixa de fissuramento principal. Dois eixos são bem delineados. Eles aparecem com um lineamento de baixo nos valores da derivada à esquerda e um alto à direita. O eixo central é claramente associado à faixa de fissuramento principal, já o que aparece mais à esquerda deve ser melhor investigado. O fato de até o AB de 80m mostrar o lineamento central não quer dizer que o mesmo seja resposta da rocha subjacente. Provavelmente a profundidade investigada por este AB ainda é bastante influenciada pelo corpo de concreto.

Adiante no texto (pg. 75) está mostrada uma correlação da resposta de resistividade com a do potencial elétrico natural (SP).

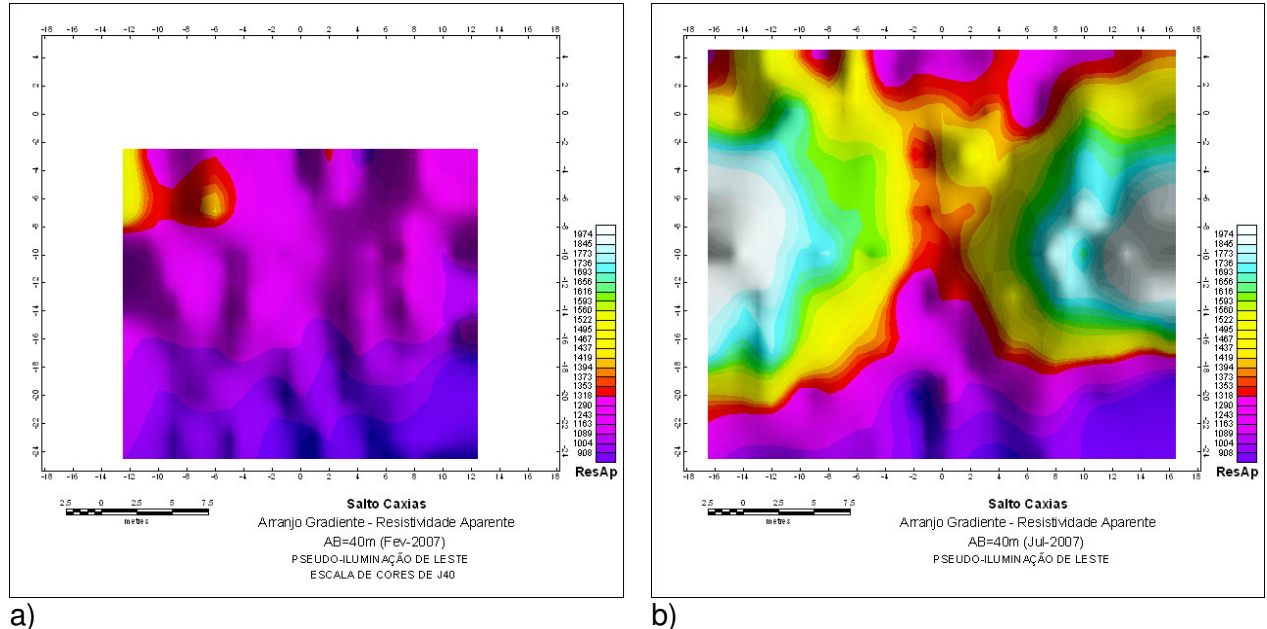
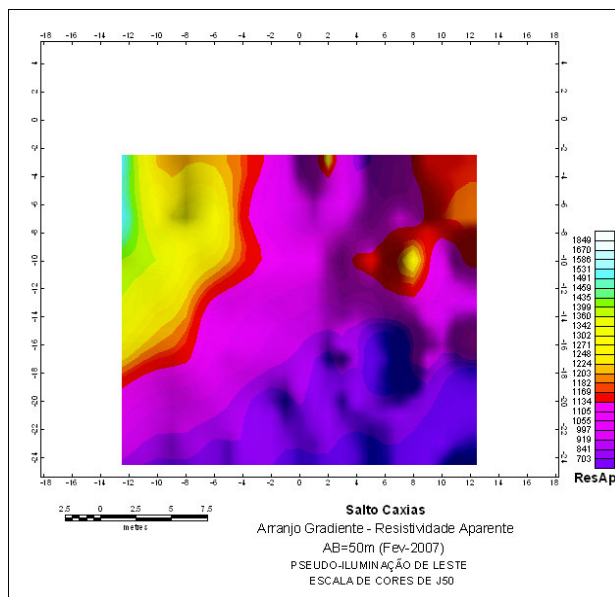
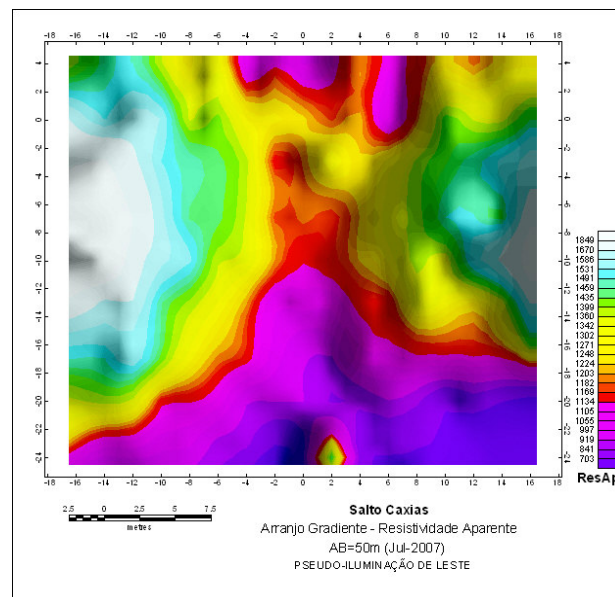


Figura 5.1.5: Mapas de resistividade aparente para o AB=40m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.

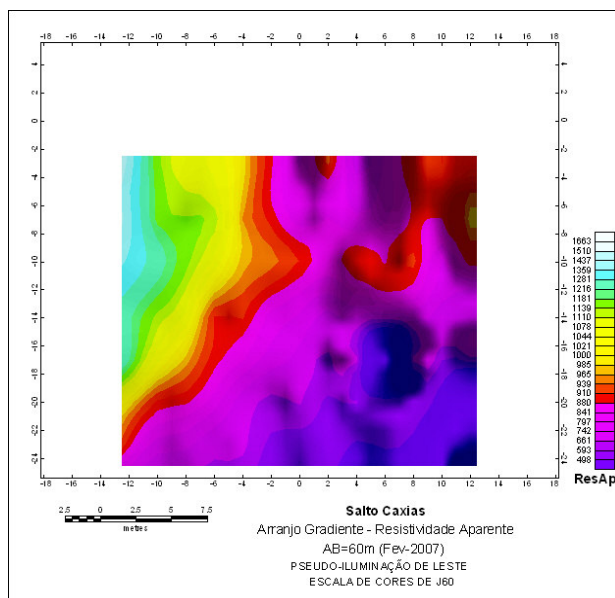


a)

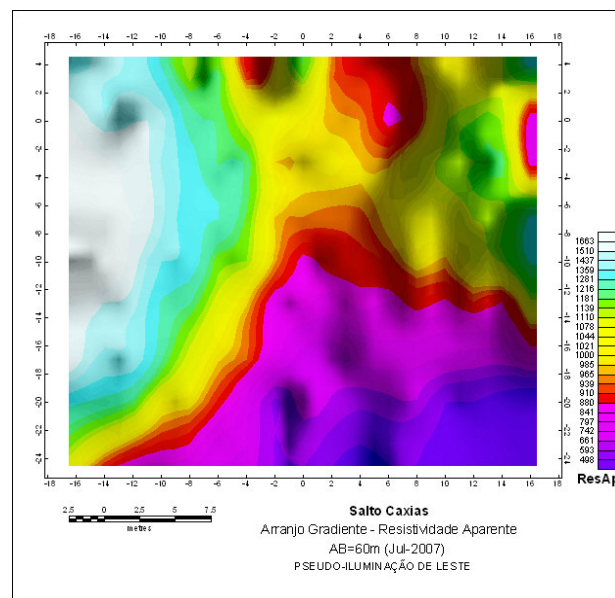


b)

Figura 5.1.6: Mapas de resistividade aparente para o AB=50m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.

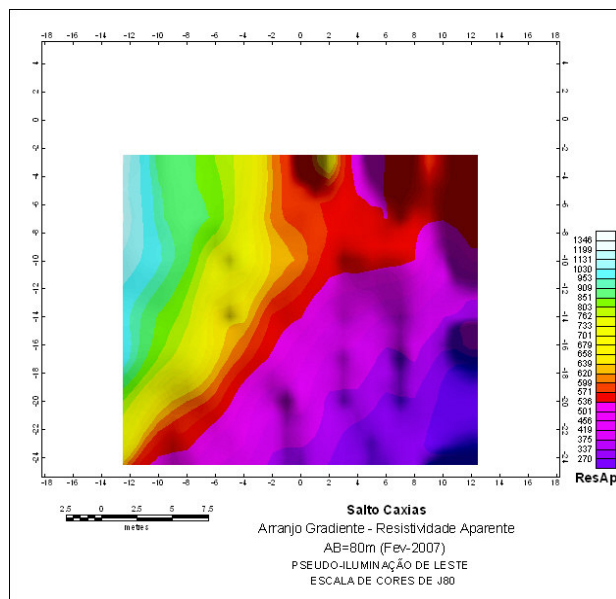


a)

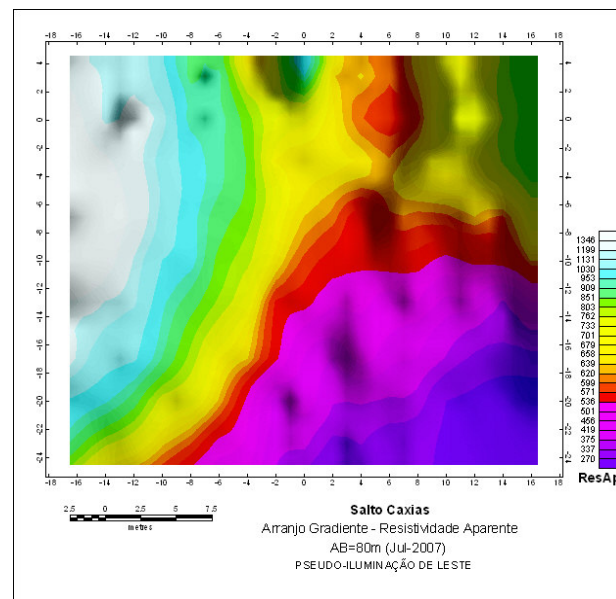


b)

Figura 5.1.7: Mapas de resistividade aparente para o A6=60m: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.



a)



b)

Figura 5.1.8: Mapas de resistividade aparente para o $A6=80m$: a) para o levantamento de fevereiro; b) para o levantamento de julho. Mesma escala de cores para ambos os mapas.

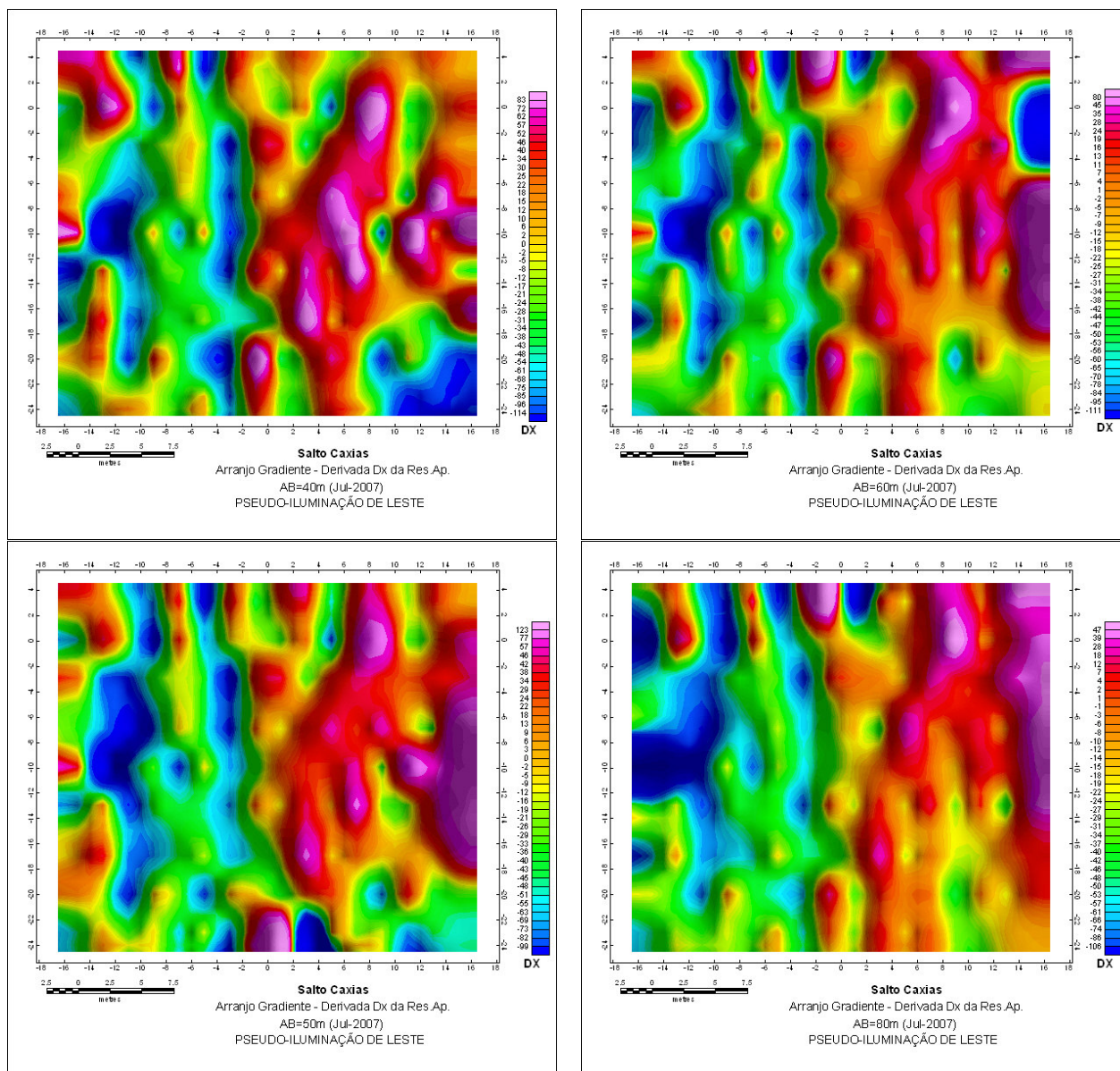


Figura 5.1.9: Derivada direcional Dx sobre os dados de resistividade aparente do levantamento gradiente de julho de 2007: AB=40m (esquerda superior); AB=50m (esquerda inferior); AB=60m (direita superior); AB=80m (direita inferior).

5.2 POTENCIAL ESPONTÂNEO

Para este ensaio foram utilizados eletrodos não polarizáveis (potes cerâmicos) com sulfato de cobre, multímetro digital de marca HC Products Co. Ltd., modelo Protek 506 e cabos múltiplos.

Os dados de SP obtidos durante as campanhas de campo de fevereiro, julho e setembro de 2007 foram processados através do Geosoft® (Geosoft Incorporated, 1994), e estão apresentados como mapa de equipotenciais (figuras 5.2.1 a 5.2.4). Interpretou-se tais produtos qualitativamente quanto aos caminhos preferenciais da água. A determinação da profundidade em que estes caminhos se encontram pode ser facilitada pelo fato de as linhas (executadas nos degraus) encontravam-se em cotas definidas.

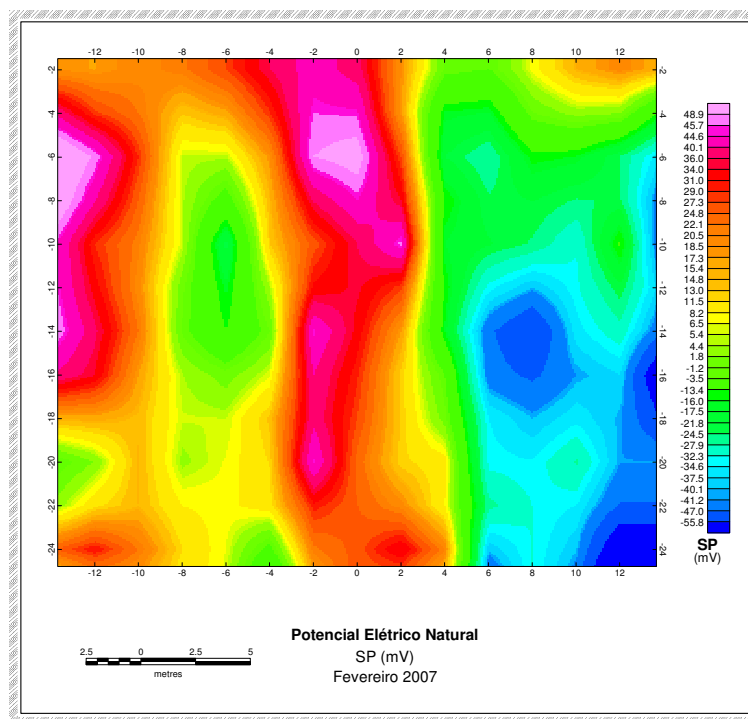


Figura 5.2.1: Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Fevereiro/07.

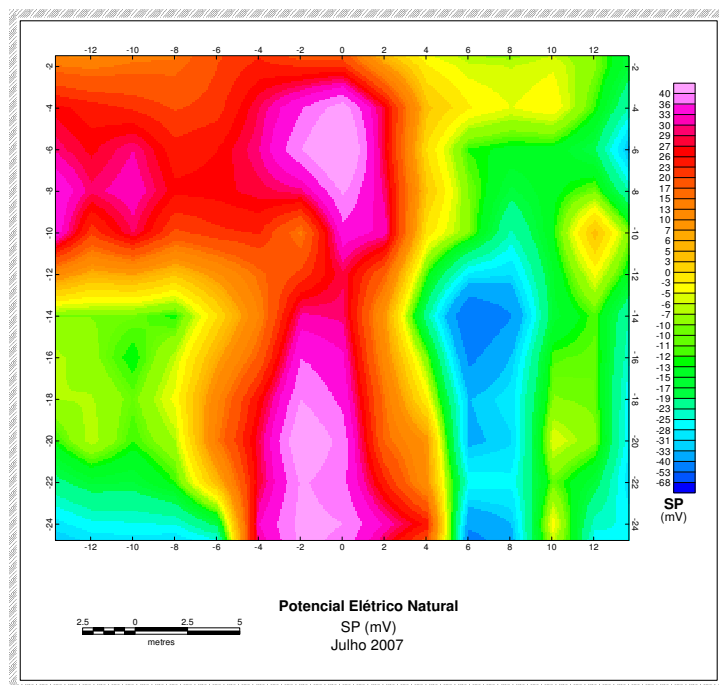


Figura 5.2.2: Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Julho/07. Com malha de 12 metros.

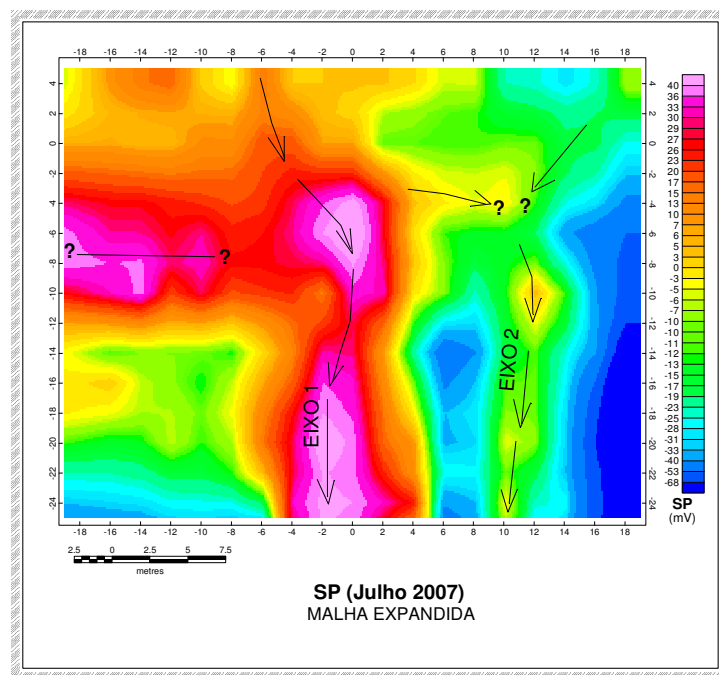


Figura 5.2.3: Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Julho/07. Eixos positivos de SP que indicam caminhos preferenciais do fluxo.

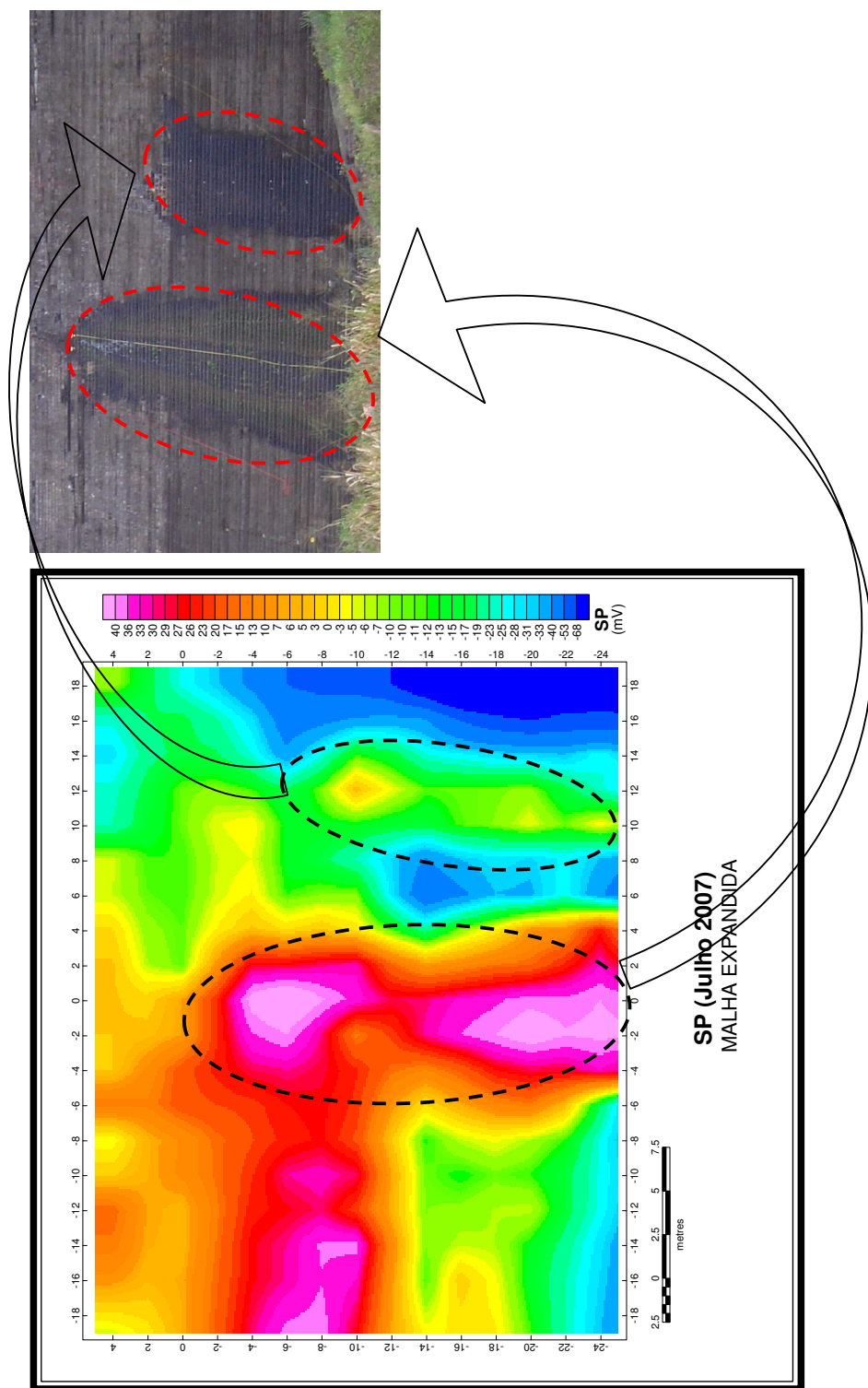


Figura 5.2.4: Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Julho/07. Com malha expandida de 16 metros. Ao lado, a correlação com situação encontrada em campo.

Numa análise comparativa, a figura 5.2.5 deixa claro que, para este caso, a associação resistividade - SP é muito indicada para a investigação proposta.

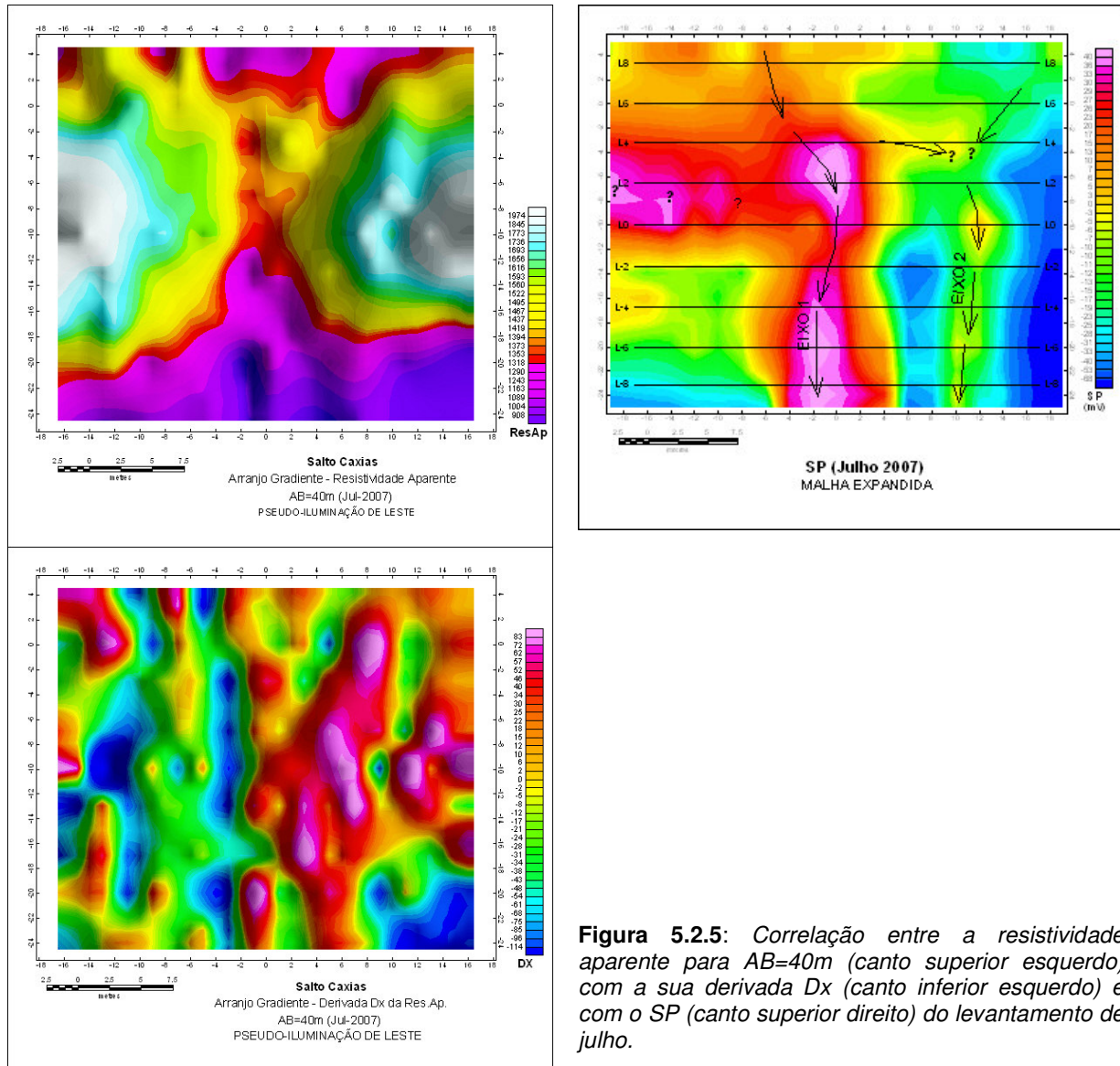


Figura 5.2.5: Correlação entre a resistividade aparente para $AB=40m$ (canto superior esquerdo) com a sua derivada Dx (canto inferior esquerdo) e com o SP (canto superior direito) do levantamento de julho.

Com o aumento da extensão das linhas de ensaio para 130 metros (65metros para cada lado a partir da linha central), pretendeu-se verificar as condições de fluxo de água no interior da barragem. A seguir, na figura 5.2.6, pode-se comparar os resultados obtidos durante as campanhas de campo de setembro e julho/07.

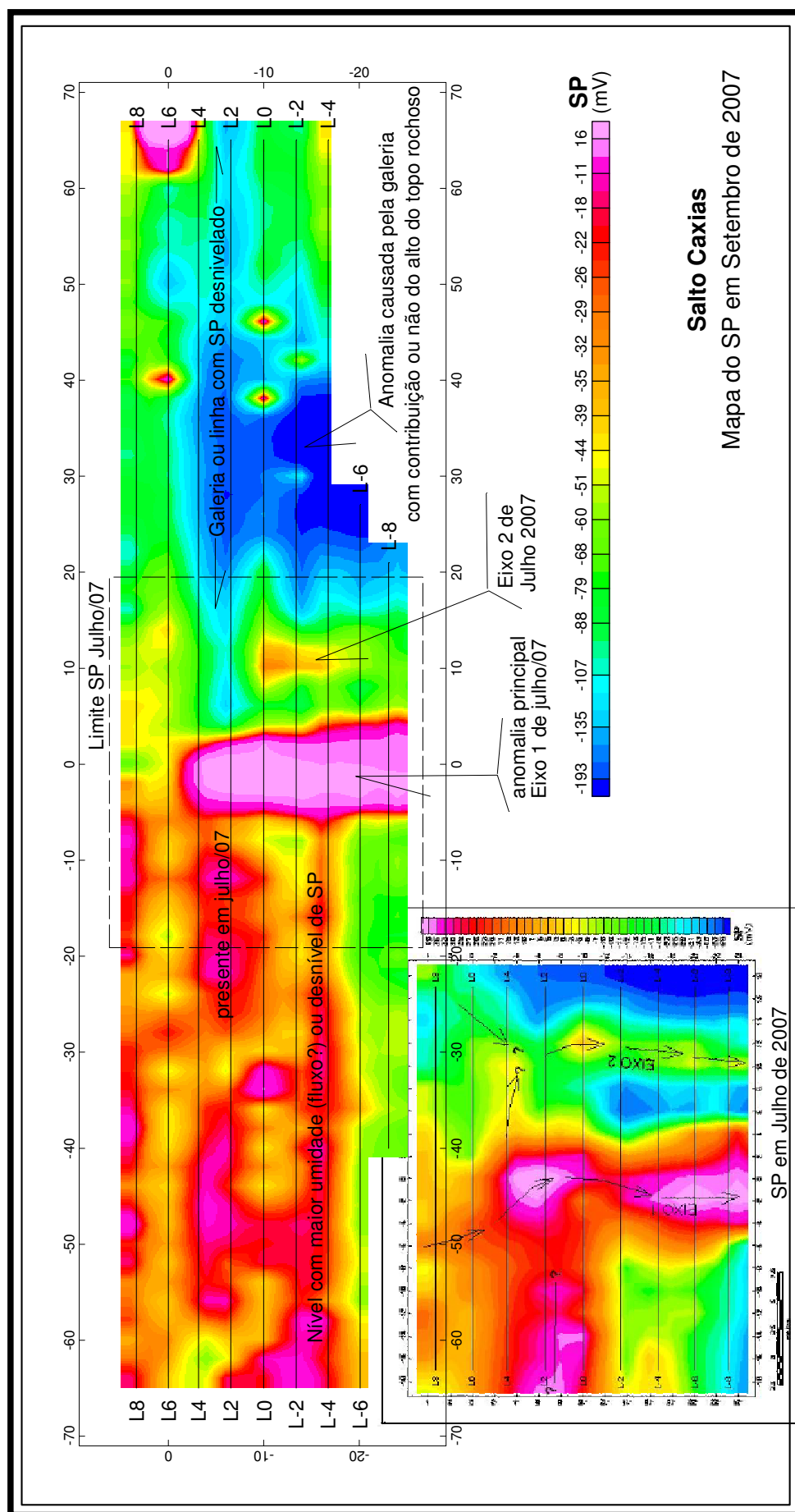


Figura 5.2. 6: Mapa de potencial elétrico natural (SP). Campanha: Setembro/07. Com malha expandida de 65 metros. No canto inferior esquerdo, o mapa de julho/07.

Comparando-se o mapa de setembro com as imagens obtidas na campanha de julho (canto inferior esquerdo) pode-se observar que as duas anomalias principais de eixos 1 e 2 (na vertical) detectados nas etapas anteriores apresentam-se mais pronunciadas, reflexo talvez do aumento da circulação de fluidos pelo interior da barragem. Como não houve uma variação significativa no nível do reservatório, se comparado às etapas anteriores, pode-se correlacionar este “aumento” na umidade interna com uma possível retração da massa de concreto, o que acarretaria uma expansão na dimensão das fissuras. Em contra partida, a anomalia condutora de eixo horizontal na linha L2, que estava presente no levantamento de julho, apresenta-se com menores proporções. Porém estas análises devem ser confirmadas através de outras informações como leituras nos outros equipamentos de monitoramento e as medições de vazão nos drenos.

O aumento da malha possibilitou um melhor mapeamento das condições de umidade interna da barragem. Outras variações de SP foram detectadas à esquerda da linha central, principalmente nas linhas L2 e L-4 (com eixo horizontal), e outra a partir dos 65 metros a qual parece receber contribuição da carga hidráulica da fissura do bloco B8.

Na porção direita do mapa observa-se um baixo de SP com alguns “outliers” (pontos isolados de anomalia, provenientes de ruídos ou problemas de medida durante o ensaio).

Este comportamento anômalo tem forte contribuição da galeria inferior e também do topo rochoso intensamente fraturado (figura 5.2.7), os quais mascaram as resposta de SP do concreto.

Para a comprovação desta hipótese deve-se recorrer à memória técnica do projeto da usina para uma pesquisa intensa na documentação e verificação das condições em que se encontrava o maciço rochoso do leito do rio, neste ponto, antes e durante a construção do empreendimento. Bem como se houve algum tipo de tratamento, e qual foi sua eficácia, nas fraturas de jusante.

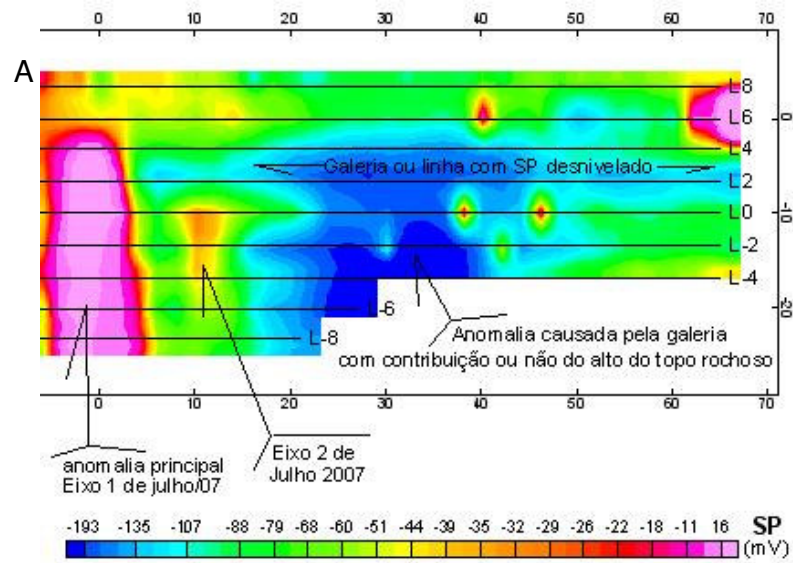


Figura 5.2. 7: Correlação entre o baixo de SP e as condições encontradas em campo. Na figura A observa-se a anomalia negativa de SP (tons de azul). Na figura B estão dispostas as projeções das galerias superior e inferior, a adufa de compensação e do topo rochoso. Na figura C as condições de fraturamento a jusante do maciço.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A proposta inicial desta pesquisa era a de desenvolver metodologias ou ferramentas, eficientes e a baixo custo, que pudessem auxiliar nas atividades de monitoramento das condições estruturais das barragens das usinas hidrelétricas no Estado.

As mais de vinte usinas de geração de energia do Estado apresentam processos construtivos distintos, passando por construções inteiramente em concreto estrutural, face de com concreto com núcleo de argila, enrocamento com face de concreto e em concreto compactado com rolo (CCR), caracterizando a evolução tecnológica desta engenharia de construção.

Com caráter inovador este trabalho pretendeu adequar alguns dos métodos e técnicas geofísicas a estas novas condições geotécnicas. A utilização de métodos geoeletricos em barragem de concreto exigiu uma adequação quanto aos equipamentos e arranjos de campo.

Para os ensaios na barragem da Usina Gov. José Richa (Salto Caxias), métodos inicialmente cogitados como o GPR e sísmica de refração não puderam ser aplicados devido à restrições operacionais, onde o projeto construtivo não permitia a realização destes testes de uma maneira segura e eficiente.

A utilização de métodos eletromagnéticos, principalmente o GPR, esbarra na dificuldade operacional em campo. Além da forte inclinação da rampa, os degraus da face de jusante da barragem apresentam largura entre 15 e 20 centímetros, o que dificulta a utilização de antenas com tamanho e frequência suficientes para atingir as profundidades de interesse. A superfície irregular do concreto também impossibilita que as antenas sejam mantidas rentes ao degrau. Outra limitação sobre a aplicabilidade do GPR, é porque a resposta esperada deste método decorre de um contraste na constante dielétrica entre o concreto seco e a zona de fratura saturada. Como todo o corpo de concreto tem umidade considerável, questiona-se se este contraste de fato existirá.

A idéia de utilizar métodos sísmicos, também foi descartada para estes levantamentos. Para este nível de detalhe, a detecção de fissuras/fraturas exigiria sísmica de alta resolução, o que não seria economicamente aplicável.

Em contrapartida, no concreto CCR por possibilitar melhores condições de umidade interna, mostrou-se suficientemente condutor e conseguiu-se aplicar com relativo sucesso os métodos elétricos.

Desta maneira ressalta-se que a escolha do método, técnica e/ou arranjo geofísico a ser empregado dependerá sobremaneira do maciço, das condições construtivas, dos objetivos almejados e do grau de detalhe requerido.

Independentemente do tipo de construção, é aconselhável a utilização de dois ou mais métodos/técnicas de investigação, comparados e correlacionados com outros sistemas de monitoramento existentes na estrutura, sempre que isto for possível.

A eletrorresistividade é um método amplo e aplicável quase que em todas as situações.

Para os ensaios realizados na barragem de Salto Caxias, a técnica do caminhamento com o arranjo gradiente buscou diagnosticar a aplicabilidade de métodos geoelétricos em geral, além do objetivo específico de apoiar o levantamento de SP na determinação dos caminhos preferenciais de fluxo. Nesta pesquisa a análise dos resultados é feita apenas sobre os dados de resistividade aparente de forma qualitativa, mas mostrou-se extremamente eficiente.

Os dados do arranjo gradiente requerem agora um extenso e intenso trabalho de modelagem numérica. Sugere-se uma análise quantitativa através de processos de inversão 3D para obtenção de modelos 3D, os quais possibilitarão uma interpretação mais conclusiva nos vários aspectos explorados.

O método Potencial Elétrico Natural mostrou-se uma excelente ferramenta de investigação (detecção e mapeamento) dos caminhos preferenciais de fluxo no talude jusante da barragem de Salto Caxias. Além das respostas marcantes ao longo de fraturas com fluxo visível, o método

apresenta bom rendimento e baixo custo tanto de execução como de investimento necessário em instrumentação.

Condicionantes construtivas, como o posicionamento da galeria de drenagem e o intenso fraturamento do maciço rochoso do leito do rio prejudicaram uma análise mais precisa dos resultados. Porém fora desta região os contrastes de SP mostraram-se muito evidentes e propiciaram uma excelente delimitação das zonas de fluxo.

Estudos posteriores realizados em áreas distintas poderão definir melhor a eficácia do método para investigação nestas condições. No entanto, como a geofísica é uma ciência interpretativa, cujo o resultado único comumente não ocorre, cabe aos profissionais envolvidos, geofísicos, geólogos e engenheiros, interagirem na análise do problema e na busca de soluções.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Braga, A. C. O., 2006. *Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação da águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática*. Tese de livre docência. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus Rio Claro. UNESP. Rio Claro. 123p.
- Braga, A. C. O., 2007. Métodos Geoeletricos aplicados: Módulo: Hidrogeologia. Notas de Aula. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus Rio Claro. UNESP. Rio Claro. Acesso em: 04/05/07, na: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/geoeletricos-V3.pdf>
- Carvalho, L.H., Vasconcelos, E. M., Mota, L., Cabral, W. S., 2004. *Comissão para Avaliação Técnica do Acidente da Barragem do Câmara – Relatório Técnico*. Gov. do Estado da Paraíba, Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH. Acesso em: 13/10/06, na http://www.paraiba.pb.gov.br/camara_relatorio/relatorio_tecnico.shtml#_Toc82236117.
- Corwin, R.W., 1989. *Geotechnical Applications of the Self-Potential Method*, US Army Corps of Engineers, Washington, DC
- Edwards, L. S., 1977. *A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization*. Geophysics, 42, 1020-1036.
- Ellert, N., Sanches, W., 1982. *Detecção de fuga d'água em reservatórios utilizando técnicas geofísicas (potencial espontâneo)*. In: Boletim IG-USP, v 13, p. 15-24.
- Gallas, J. D. F., 2000. *Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia*

ambiental. Tese de doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus Rio Claro. UNESP. Rio Claro. 174p.

Gallas, J. D. F., 2005. *O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais*. Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 23, n. 2. Acesso em: 10/07/2007, na: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2005000200003&lng=en&nrm=iso>.

Gallas, J. D. F., Taioli, F., Silva, S. M. C. P., Coelho, O. G. W., Paim, P. S. G., 2005. *Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade*. Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 23, n. 1. Acesso em 12/12/2007, na: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2005000100005&lng=en&nrm=iso>.

Gordon Jr., M., 1947. *Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul*. Dep. Nac. Prod. Min., Div. Geol. Miner., Notas Prelim. Est. N.º 38, 20 pp.

Iyomasa, w. S., Blanco, R. G., Strufaldi, E. G. B., Olivito, J. P. R., Rocha R., Vasconcelos, S. E., Melo, I. A., Silva, A. R., 2005. *Levantamento geológico e geofísico aplicado à investigação de fluxo de água de sub-superfície: um exemplo na barragem do Rio Atibainha, SP*. In: 11º. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, Florianópolis. Anais ABGE, p. 1753-1767.

Leinz, V., 1949. *Contribuição à geologia dos derrames basálticos do Sul do Brasil*. FFCL/USP. Boletim Geologia, v. 5, p.61.

Levis P., Marques Filho, P. L., Terres, J. F., 1998. *Aspectos Geológicos das Barragens da derivação do Rio Jordão e de Salto Caxias*. In: III Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo. Foz do Iguaçu, PR.

- Medeiros, W.E., Lima, O. A.L., 1999. *Origem do Potencial Elétrico Espontâneo em Rochas Cristalinas Fraturadas e sua Utilização na Locação de Poços*. In: BRAZILIAN JOURNAL OF GEOPHYSICS, v. 17(2,3)
- Milani E.J., Ramos V.A., 1998. *Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná*. Revista Brasileira de Geociências 28(4):473-484.
- Milani E.J., França A.B., Schneider R.L., 1994. *Bacia do Paraná*. Bol. Geoc. Petrobrás 8(1):69-82.
- Oliveira, A.M.S., Brito, S.N.A., 1998. *Geologia de Engenharia*, São Paulo, ABGE 587p.
- Orellana, E., 1972. *Prospeccion geoelectrica em corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523p.
- Paiva Filho A. 2000. *Estratigrafia e tectônica do nível de riolacitos pórfiros da Formação Serra Geral*. Inst. de Geociências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, Tese de Doutorado, 350 p.
- Paulipetro, 1981. *Relatório de atividades 1979/1981*, 59p.
- Petri S., Fúlfaro J.V., 1983. *Geologia do Brasil*. São Paulo, 558p.
- Portela, K. F., Moser, D.E., Joukoski, A, Zorzi, R.R., 2006. *Extração, análise e caracterização de testemunhos de concreto extraídos da barragem da UHE Salto Caxias – Relatório Técnico 1709/2006*. Curitiba, 97p.
- Riccomini C., Gimenez Filho A., Almeida F.F.M., 1984. *Considerações sobre a estratigrafia do Permo-Triássico na região da Serra do Cadeado, Paraná*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro. Anais SBG, v.2, p.754-763.

- Schneider R.L., Muhlmann H., Tommasi E., Medeiros R.A., Daemon R.F., Nogueira A.A., 1974. *Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná*. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 28, Porto Alegre, Anais, (1):41-65.
- Schobbenhaus C., Almeida Campos D., Derze G.R. & Asmus H.E., 1984 *Geologia do Brasil*. Brasília, DNPM, 501p.
- Soares, M. A., 2005. *Relatório técnico – Junta de Consultores, SCX-RT-001/2005-R0*. COPEL GERAÇÃO/SPG/ENGC. Curitiba, PR,. 103p
- Sumner, J.S., 1976. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Elsevier Scientific Pub. Co.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. Second Edition, 770p.
- Ward, S. H., 1990. *Resistivity and Induced Polarization Methods*. In: GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL GEOPHYSICS; Stanley H. Ward ed. SEG, Tulsa.
- White, I. C., 1908. *Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil*. Rio de Janeiro, Publ. Imprensa Nacional. p. 617.
- Zalán P.V., Wolf S., Astolfi M. A. M., Viera .S., Concieção J.C.J., Neto E.V.S., Marques A., 1987. *Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná*. III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, v.1, p.441-473.